

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Г. І. Гайко

**БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ
І КОНСТРУКЦІЇ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД
КОНСТРУКЦІЇ КРІПЛЕННЯ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Геоінженерія»
спеціальності 184 «Гірництво»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензент:

*Шашенко О. М., д-р техн. наук, проф.,
професор кафедри будівництва,
геотехніки та геомеханіки НТУ
«Дніпровська політехніка»*

Відповідальний

редактор:

Кравець В. Г., д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №
2 від 31.10.2019 р.) за поданням Вченої ради Інституту
енергозбереження та енергоменеджменту
(протокол № 3 від 30.09.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Гайко Геннадій Іванович, д-р техн. наук, проф.

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ І КОНСТРУКЦІЇ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД КОНСТРУКЦІЇ КРІПЛЕННЯ

Будівельні матеріали і конструкції підземних споруд: Конструкції кріплення [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво» / Г. І. Гайко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,37 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 134 с.

Розглянуто матеріали та конструкції кріплення підземних споруд, їх складові елементи, особливості роботи, проектування та монтажу; розкриті історичні відомості, узагальнено вітчизняний та зарубіжний досвід останніх років в області кріплення підземних споруд.

Табл. 4 Іл. 131

© Г. І. Гайко, 2019

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ВСТУП

Кріплення підземних споруд, їх підтримання в робочому й безпечному стані є одним з основних і найбільш важливих виробничих процесів при освоєнні підземного простору. Для фахової підготовки бакалавра з гірництва курс “Будівельні матеріали і конструкції підземних споруд” (значну частину якого охоплює представлений навчальний посібник) має першорядне значення, оскільки закладає підвалини для майбутньої професійної діяльності, формує фахові підходи до розв’язання основних інженерних завдань підземного шахтного будівництва.

Оскільки проблема забезпечення стійкості гірничих виробок має комплексний характер, то означена навчальна дисципліна тісно пов’язана з фізикою й механікою гірських порід, технологією гірничих робіт та дисциплінами суто будівельного циклу. Особливе значення відводиться взаємодії модуля «Конструкції кріплення» з курсом “Геомеханіка”, який визначає закономірності взаємодії будівельних конструкцій з породним масивом, розкриває особливості формування гірського тиску й навантаження на підземні споруди.

Основною метою посібника “Матеріали і конструкції підземних споруд. Конструкції кріплення” є набуття студентами знань, які дозволяють у залежності від призначення споруди, геологічних і гірничотехнічних умов її спорудження її стану гірського масиву обирати тип, матеріал і параметри кріплення, що забезпечують надійну й економічну експлуатацію виробки. Рівень та характерні процедури навчальних цілей відображені в таблиці 1.

Посібник орієнтований на самостійну роботу студентів, яка може випереджати аудиторні заняття, що повинно забезпечити максимальну швидкість і якість засвоєння навчального матеріалу. Це зумовило особливості посібника: стислість і простоту викладу, конкретність та поступовість описів, акценти на головні особливості роботи матеріалів і конструкцій, значну кількість ілюстрацій. Автори намагалися дотримуватися традицій кращих підручників української школи геоінженерії (М.М.Протодьяконов, 1908, 1933р.; О.П.Максимов, 1973р., О.М. Шашенко, 2016), які орієнтовані на максимальне використання навчального матеріалу в інженерній практиці.

Для розуміння технічної еволюції інженерних рішень застосовані історичні екскурси, які розкривають шляхи розвитку різних типів і матеріалів кріплення. Огляд конструкцій подано за будівельним матеріалом кріплення (дерево, кам’яне, бетонне, залізобетонне, сталеве, породноносійне тощо), що значною мірою визначає його конструктивні можливості, технологію монтажу та особливості роботи. Одночасно такий підхід підсилює зв’язок модуля «Конструкції кріплення» з модулем «Будівельні матеріали підземних споруд». Поряд з типовими конструкціями в посібнику розглянуто технічні розробки останніх років, які значною мірою скорочують матеріаломісткість конструкцій, поширюють ефективну область їх застосування (м.і. розробки автора, які пройшли кваліфікаційний захист і практичну апробацію).

Таблиця 1

**Навчальні цілі при засвоєнні курсу
«Матеріали і конструкції підземних споруд»**

Рівень засвоєння	Уміння, які повинен опанувати студент
1. Ознайомчо-орієнтовний	<ul style="list-style-type: none"> – знати визначення технічних термінів; – розрізняти класифікаційні ознаки й типи кріплення; – зображувати конструкції кріплення та їх елементи; – визначати та порівнювати достоїнства й недоліки конструкцій; – доводити переваги того чи іншого типу для різних умов застосування; – описувати процес монтажу кріплення – розуміти суть методів розрахунку конструкцій.
2. Понятійно-аналітичний	<ul style="list-style-type: none"> – пояснювати принципи роботи кріплення та його окремих елементів; – застосовувати типові проектування конструкцій; – оцінювати ефекти контактної взаємодії кріплення з гірським масивом; – розраховувати раціональні параметри конструкцій; – обґрунтовувати носійну спроможність та матеріаломісткість кріплення при різних варіантах навантаження; – аналізувати економічну доцільність варіантів кріплення.
3. Продуктивно-систематичний	<ul style="list-style-type: none"> – розробляти паспорти кріплення з урахуванням сучасного рівня конструкцій, будівельних матеріалів, монтажних технологій; – прогнозувати можливі "проблемні ситуації" в роботі кріплення; – вдосконалювати його конструктивні елементи; – планувати технічні заходи в разі змінення геомеханічної ситуації по довжині виробки; – оцінювати можливості застосування комбінованих конструкцій; – застосовувати різні методи проектування кріплення.

1. ТИПИ КОНСТРУКЦІЙ КРІПЛЕННЯ ТА ЇХ ГЕОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ

Підземні споруди. Функції конструкцій кріплення та вимоги до них. Класифікаційні ознаки й типи конструкцій. Фактори їх вибору. Режими роботи. Носійна здатність та піддатливість. Деформаційно-силові характеристики. Жорсткість та працездатність. Показники оптимальності конструкцій.

1.1. Сучасні підземні споруди

Технічна діяльність людства, починаючи з глибокої давнини й до теперішніх часів, тісно пов'язана з освоєнням надр, причому питання про рудження й кріплення підземних об'єктів завжди мали тут пріоритетне значення.

Прийняття печер і гротів до вимог життя первісної людини, їх збільшення та поєднання між собою дали початок підземному будівництву й архітектурі цілому. Освоєння перших корисних копалин, будівництво підземних міст, сакральних споруд започатковують створення систем штучних техногенних порожнин (*гірничих виробок*), які відображали звичайні природні форми печер. Подальший розвиток підземної інфраструктури: печерних міст, транспортних комунікацій, фортифікаційних споруд, сховищ, а також численних виробок шахтарів призвело до створення великої кількості різноманітних підземних об'єктів, класифікація яких наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 Класифікація підземних споруд

Основне призначення підземної споруди	Об'єкти, що розміщуються в підземному просторі	Вид підземної порожнини (виробки)
1. Видобуток твердих корисних копалин	Вугільні шахти, рудники, копальні нерудних мінералів	Стовбури, штольні, квершлагги, штреки, камери та ін.
2. Транспортні комунікації	Залізничні, автомобільні, гідротехнічні тунелі; метрополітен; трубопроводи	Тунелі, засипні траншеї
3. Розміщення об'єктів міської інфраструктури (підземна урбаністика)	Вокзали, станції, торговельні центри, парковки, гаражі, спортивні комплекси, ресторани, підземні переходи, міські колекторні мережі	Котловани й засипні траншеї, тунелі мілкового закладання, камери

4. Розміщення об'єктів та обладнання електро- та теплопостачання, промислових виробництв	Електростанції (або їх окремі частини); Станції теплопостачання, заводи і фабрики	Камери великих поперечних перерізів, тунелі, котловани
5. Розміщення сховищ нафти і газу, питної води, очищення стічних вод	Нафто- і газосховища, резервуари для збереження питної води; підприємства по очищенню стічних вод	Камери великих поперечних перерізів, тунелі, резервуари
6. Розміщення об'єктів військового призначення	Стартові комплекси ракет, заводи оборонного призначення, бомбосховища, командні пункти	Шахтні стволи, штольні, камери, засипні котловани

Жодна інженерна конструкція не знаходиться в такій залежності від складу, будови й властивостей гірських порід, як *підземна споруда* (об'єкт, створений у гірському масиві). Стійкість безпеки підземних споруд забезпечують за допомогою особливого типу будівельних конструкцій – гірничого кріплення. Визначальними для його проектування стають гірничо-геологічні умови та вид підземної порожнини, в якій ті розміщуються.

Серед сучасних підземних споруд найбільшими за протяжністю й об'ємом є виробки

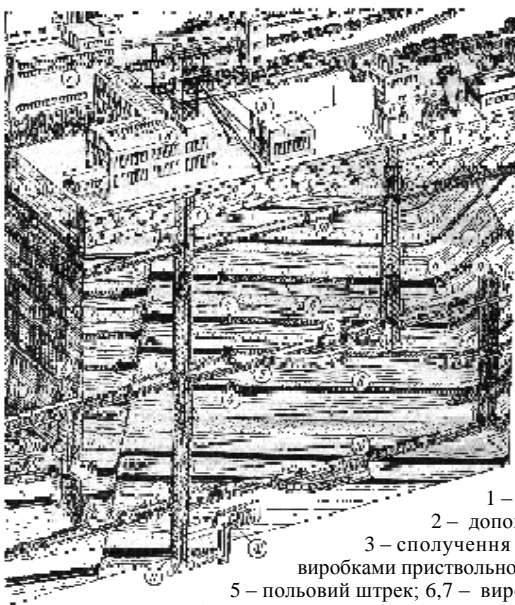


Рис. 1.1. Взаємне розташування гірничих виробок вугільної шахти:

- 1 – головний вертикальний ствол;
- 2 – допоміжний (вентиляційний) ствол;
- 3 – сполучення вертикального ствола з виробками приствольного двору; 4 – пластовий штрек;
- 5 – польовий штрек; 6, 7 – вироблений простір; 8 – гезенк; 9 – сліпий ствол; 10 – квершлаг; 11 – зумпф; 12 – насосна камера.

шахтірудників(рис.1.1),транспортітунелітаметрополітени(рис.1.2,1.3), промислові підприємства (рис. 1.4) та об'єкти підземної урбаністики (рис. 1.5).Ціспорудисуттєвовідрізняютьсяоднавідодноїформойрозмірами перерізу виробок, протяжністю, глибиною закладання, функціями та призначенням (див. табл. 1.1). Крім того, навіть однотипні споруди можуть знаходитися в різних гірничо-геологічних умовах. Цим пояснюється велика різноманітність типів конструкцій кріплення та умов їхзастосування.

Рис.1.2.ВихіднийпорталЄвро-тунелю, спорудженого під Ла-Маншем.

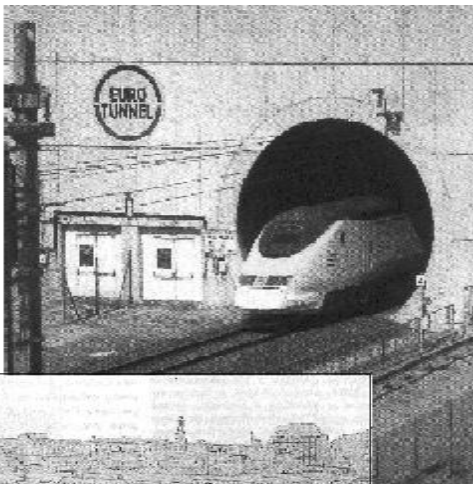


Рис. 1.3. Лінії метрополітену в центрі Будапешта (Угорщина)

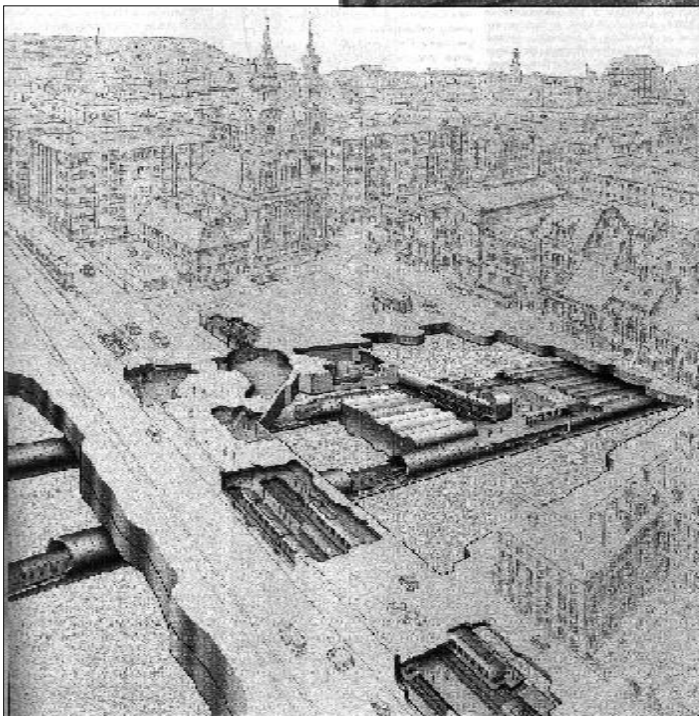




Рис. 1.4. Підземний завод шампанських вин у Артемівську (Україна)

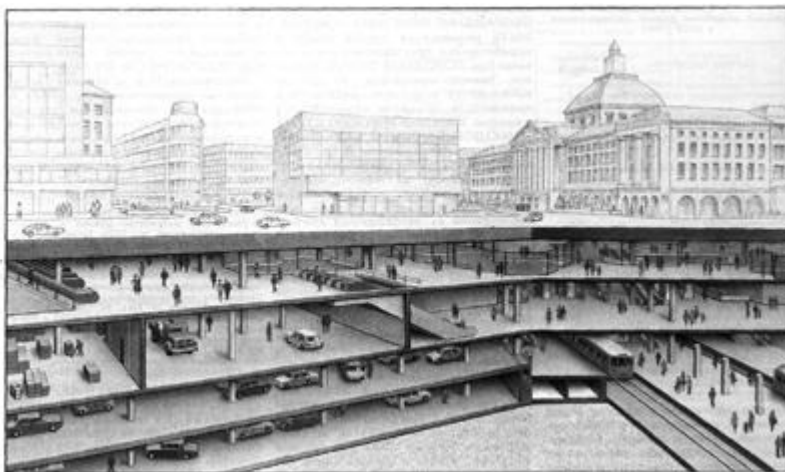


Рис. 1.5. Комплекс підземних споруд на Карсплац (Мюнхен, Німеччина)

1.2. Гірниче кріплення (оправа). Загальні відомості

Гірниче кріплення—цештучнабудівельнаконструкція,якуспору-джують у виробках для запобігання обрушень оточуючих порід і збереженнянеобхідноїплощіпоперечногоперерізутарозміріввиробокпро-тягомстрокуїхексплуатації.Упідземномубудівництві частішезастосо-вуютьтермін“**оправа**”*,якиймає значенняпостійногосуцільногокріп-лення тунелів, метрополітенів, сховищ, підземних споруд електростан-цій, міських комунікацій тощо. Оскільки сучасні будівельні геотехнології одночасно забезпечують як будівництво шахт, так і підземних споруд іншогопризначення,товцёмупосібникудляпоєднанняпонять“*гірни-чекріплення*”і“*оправа*”застосованозагальнийтермін“*конструкціїкрі-плення*”,якийувійшовунауковий(інженерний)обігбільшостікраїн.Застос-овуєтьсятакожпоняття“*інженерніконструкції*”підземних споруд, яке об’єднує конструкції кріплення та масив гірських порід, що оточуєвиробку.

Функції конструкцій кріплення передбачають забезпечення проек-тнихрозмірівспоруд,сприйняттяйперерозподілзовнішніхівнутрішніх навантажень,охоронувідвивалівтаобрушень оточуючихпорід,запобі-гання їх руйнуванню й вивітрюванню, гідроізоляцію виробок, гладкість їх контуру(для зменшенняопорурухуповітряабоводи) таінше.

Конструкції кріплення повинні задовольняти комплексу функціона-льних, технічних та економічних *вимог*, зокрема:

- забезпечувати робочий стан виробки (споруди) протягом строку служби;
- витримувати навантаження від гірського тиску безруйнування (вимога міцності) та зберігати своє проектне положення (вимога стійкості);
- не заважати виробничим (транспортним) процесам при прове-денні та експлуатаціївиробки;
- забезпечувати технологічність та механізаціюмонтажу,
- бути транспортабельними йремонтпридатними;
- знижувати коефіцієнт аеродинамічного опорувиробки;
- забезпечуватистійкість протикорозіїтагниття,безпекувпожеж-номувідношенні;
- забезпечувати уніфікацію елементів кріплення та індустріальні спо-соби їхвиробництва;
- передбачати відповідність матеріалу кріплення строку служби виробки;
- мінімізувативитратикріпильнихматеріалівнаодиницюнесучоїспро-можності конструкції та сумарні витрати на кріплення йпідтримання виробки.

* рос. «обделка»

Велика кількість різноманітних конструкцій кріплення може бути згрупована за певними *класифікаційними ознаками* (рис. 1.6), які визначають *тип кріплення*.



Рис. 1.6. Класифікаційні ознаки конструкцій кріплення

За функціональним призначенням виділяють: **кріплення гірничих виробок шахт** (капітальних, підготовчих та очисних; горизонтальних, похилих та вертикальних виробок; камер; сполучень і перетинів); **оправи транспортних тунелів і метрополітенів**; **оправи підземних гідротехнічних споруд** (напірній безнапірній тунелі, машинні зали ГЕС, камери); **оправи підземних споруд спеціального призначення** (підземні заводи, сховища, ємності, гаражі, колекторні тунелі).

За строком служби кріплення поділяють на **тимчасове** і **постійне**.

Тимчасове споруджують у виробі до зведення постійного, що зумовлено в більшості випадків несумісністю прохідницьких робіт з одночасним спорудженням основних конструкцій. Постійне кріплення регламентують строком служби до 10, до 50, більше 50 років згідно з властивостями будівельних матеріалів та призначенням виробок.

За матеріалом конструкцій: кріплення **дерев'яне** (із сосни, смереки, ялиці, модрини, кедра); **металеве** (чавунні тубінги, сталевий прокат, сталеве литво, арматурна листова сталь, канати); **кам'яне** (природний камінь, цегла, бетоніти); **бетонне** (монолітний бетон, торкретбетон, набризкбетон та ін.); **залізобетонне** (монолітний залізобетон з гнучкою або жорсткою арматурою, збірний залізобетон); **породоносійне** (із розвантажених і зміцнених порід); **полімерне** (оболонки по контуру виробки, полімерні анкери); **змішане**.

За *формою*: **склеписте** (арочне, еліптичне та ін.), **кільцеве, прямокутне, трапецієвидне, полігональне, стовпчасте; замкнуте** (охоплює повний контур) і **незамкнуте** (на частині периметра). Форма кріплення відповідає формі виробка та зумовлюється її функціональним призначенням та стійкістю контуру в залежності від переважних напрямків гірського тиску (рис. 1.7).

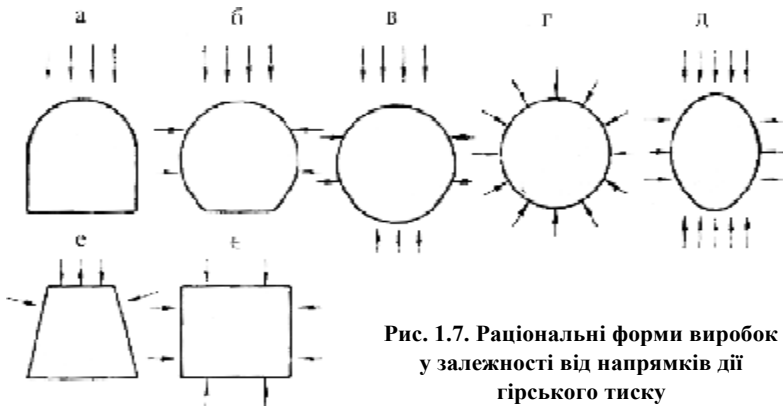


Рис. 1.7. Рациональні форми виробок у залежності від напрямків дії гірського тиску

За *конструктивними ознаками*: кріплення **рамне, суцільне, органне, кострове, анкерне**. **Рамне** кріплення складається з кріпильних рам (дерев'яних, сталевих, залізобетонних, змішаних), які встановлюють у виробках на певній відстані одна від одної, а проміжними рамами перекривають спеціальною огорожею (затяжкою). **Суцільне** кріплення безперервно перекриває поверхню виробки в повздовжньому напрямі й виконується як монолітна конструкція (бетонна, залізобетонна) або збірна з окремих однотипних елементів, встановлених впритул один до одного (блоки, панелі, тубінги). **Органне** кріплення – це стояки (зазвичай дерев'яні), встановлені впритул до одна на одне декілька рядів (подібно до труборгану, від якого й пішла назва конструкції). **Кострове** кріплення складається з кріпильних конструкцій стовпчастої форми з окремих дерев'яних, металевих або пневмобалонних елементів, які укладаються один на одного в певному порядку. **Анкерне** кріплення – це система металевих, полімерних, залізобетонних або дерев'яних стержнів (анкерів), закріплених у шпурхах за допомогою замків або скріплюючих сумішей.

За *деформаційно-силовими характеристиками* виділяють **жорстке** (зміщення до 50 мм), **малоподатливе** (до 100 мм), **податливе** (300–400 мм) та **особливо податливе** (більше 400 мм) кріплення з постійним, лінійно-чирнелінійно-наростаючим опором. **Жорстке** кріплення забезпечує нерухому фіксацію несучих елементів, зміщення яких можливі тільки за рахунок

руйнівного деформування конструкції (бетон, залізобетон, жорсткі сталеві рами). **Податливе** кріплення зберігає несучу здатність при значних змінах розмірів кріплення, викликаних зміщеннями оточуючих порід. Режим податливого опору забезпечують особливі конструктивні елементи – вузли податливості спецпрофілів, демпферні прокладки, опори з можливістю зминання тощо. Проміжним між жорсткими та податливими конструкціями виступає **шарнірне** кріплення, в якому носійні елементи можуть переміщуватися відносно один одного навколо шарніра, що забезпечує корисний перерозподіл навантажень на раму без порушення працездатності кріплення.

За *носієюною спроможністю* розрізняють: **огорожувальні** конструкції (облицювання, покриття, ізолюючі та запобіжні кріплення) та **носіїні** конструкції (*малопотужні* – зносійною спроможністю до 0,1 МПа; *середні* – від 0,11 до 0,3 МПа; *потужні* – від 0,31 до 1 МПа; *особливо потужні* – більше 1 МПа). За характером прояву носійної здатності виділяють *підпирні та породонасійні* (зміцнювальні) конструкції, а також їх комбінації.

За *технологічним рішенням*: **збірні** конструкції (зокрема каменів, плит, блоків, тюбінгів, стержневих елементів); **монолітні** (бетонні та залізобетонні); **набризкові** (полімерні оболонки, набризкбетон); **збірно-монолітні** (монолітназовнішня оболонка із збірний внутрішній шар, монолітні стіни із збірне склепіння та ін.).

За *способом зведення* конструкцій: **гірничий** (звичайний) спосіб, коли кріплення монтують у підземному просторі, та **спеціальні** способи, пов'язані з силовим впровадженням конструкцій кріплення в гірський масив. Серед останніх виділяють:

забивне кріплення, що випереджає вибій виробки в сипучих чи пливких породах та складається з встановлених впритул одна до одної шпунтин, під захистом яких проводять виїмання породи;

заглибне (опускне) кріплення у вигляді циліндра з ріжучимопирачем, який занурюється в масив слабких порід під власною вагою (вертикальні стволи) чи за допомогою домкратів (похилі й горизонтальні виробки) та інші типи.

Вибір конструкцій кріплення підземних споруд зумовлений сукупністю вихідних положень і гірничо-геологічних факторів, зокрема:

- видом і призначенням підземних споруд;
- їх строком служби;
- формою й розмірами виробок;
- геомеханічними властивостями масиву гірських порід;
- розташуванням і способом охорони виробок (для шахтірудників);
- технологією їх спорудження;
- економічною доцільністю.

Оптимальне проектне рішення передбачає аналіз кількох раціональних варіантів кріплення з урахуванням сумарних витрат на спорудження та підтримання виробки (скорочення загальної вартості кріплення й ремонтних робіт протягом експлуатації виробки).

1.3. Геомеханічні параметри та режими роботи кріплення

Конструкції кріплення підземних споруд суттєво відрізняються від інших будівельних конструкцій імовірнісним, змінним за інтенсивністю характером постійного навантаження, що зумовлено формуванням зони зруйнованих порід навколо виробки та умовами контактної взаємодії кріплення з оточуючими породами (грунтами). З позицій геомеханіки доцільно відобразити деформаційно-силові характеристики кріплення *геомеханічними параметрами*, які незалежні від типу конструкцій, дають змогу оцінити особливості їх роботи.

Серед основних геомеханічних параметрів виділяють **носіюну здатність кріплення** (опір, реакцію) та **податливість** (жорсткість). Опір характеризує силову, а податливість – деформаційну взаємодію з породним масивом. Графічне або аналітичне зображення зв'язку між носійною здатністю й податливістю кріплення називається його *деформаційно-силовою характеристикою* (ДСХ). Ваналітичній формі рівняння ДСХ має вигляд:

$$U = U(q) \quad \text{або} \quad q = q(U). \quad (1.1)$$

У залежності від ДСХ розрізняють два граничних (ідеалізованих) *режими роботи* кріплення – **жорсткий** та **податливий** (рис. 1.8). **Жорсткий** режим визначається у вигляді обмежених (заданих) кріпленням допустимих зміщень породного контуру. На рис. 1.8 задані зміщення породного контуру, яка

показує, що спочатку породний контур змістився на величину $U_{ж}$, потім, після контакту з кріпленням, зміщення порід зупинились і почало зростати навантаження q . Після досягнення навантаженням граничного (максимально допустимого) рівня $q_{ж}^*$ починається руйнівна деформація кріплення.

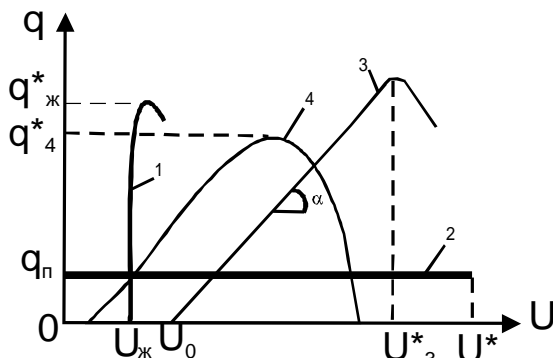


Рис. 1.8. Деформаційно-силові характеристики кріплення з жорстким (1), податливим (2); лінійним (3) та нелінійним (4) режимами роботи

Податливий режим, показаний лінією 2 на рис. 1.8, характеризується заданим опором кріплення q_n зміщенням породного контуру. При цьому податлива конструкція має можливість “уходити” від гірського тиску, зберігаючи носійну здатність. Коли зміщення перевищать межую конструктивної піддатливості U^* , кріплення руйнується. Таким чином, стан кріплення описують двома групами показників: заданими ($U_{ж}$ або q_n), які реалізують робочі характеристики конструкції, та граничними (q^* або U^*), при досягненні яких нормальна експлуатація конструкції неможлива.

Податливий режим може мати характер *лінійно-наростаючого опору* (графік 3 на рис. 1.8), коли до моменту контакту з кріпленням порода змістилася на величину U_0 , а потім зміщення кріплення U ростуть пропорційно збільшенню навантаження q до початку руйнівної деформації конструкції U^* . Ступінь “**жорсткості**” кріплення зумовлений кутом нахилу α

лінії 3 до осі U . Чисельно коефіцієнт жорсткості C_k дорівнює:

$$C_k = \operatorname{tg} \alpha (0 \leq C_k \leq \infty). \quad (1.2)$$

Чим більше C_k , тим ближче ДСХ кріплення до жорсткого режиму роботи.

Найбільш загальний випадок ДСХ наростаючого опору подано графіком 4 (див. рис. 1.8) де коефіцієнт жорсткості змінюється й дорівнює в кожній точці похідній:

$$C_k = \frac{dq}{dU} \quad (1.3)$$

Накінцевій стадії ДСХ завжди має спадну лінію ($C_k < 0$), тобто при збільшенні деформації U носійна здатність кріплення q зменшується. Чим більше від’ємне значення коефіцієнта жорсткості, тим більша можливість крихкого руйнування конструкції. В реальних конструкціях ДСХ можуть значно різнитись за напрямками навантаження та в залежності від контактних умов взаємодії з масивом.

Важливою особливістю взаємодії кріплення з масивом є зв’язок між розміром зони зруйнованих порід навколо виробки та величиною піддатливого опору кріплення. Навантаження на конструкцію можна визначити із рівняння рівноважного стану (1.4), в якому ліва частина характеризує залежність зміщень U на контурі виробки від реакції кріплення, а права виражає залежність піддатливості самого кріплення від величини діючого навантаження:

$$U_{\infty}(P) - U_0 = U(P), \quad (1.4)$$

де $U_{\infty}(P)$ – зміщення породного контуру намомент встановлення статичної рівноваги в системі “кріплення – породний масив”;

U_0 – початкове зміщення породного контуру до введення кріплення в роботу (до контактної взаємодії конструкції з масивом);

$U(P)$ – зміщення зовнішнього контуру кріплення до встановлення статичної рівноваги в системі “кріплення – породний масив”.

Рішення рівняння (1.4) зручно подати графічно (рис. 1.9). Крива 1 відображає ліву частину рівняння, а прями 2, 3, 4 характеризують праву частину при різних значеннях жорсткості кріплення. Точки їх пересікання O_2, O_3, O_4 з кривою 1 визначають величини гірського тиску на кріплення й відповідні зміщення контуру виробки. Аналізуючи графіки, можна припустити, що чим менша жорсткість і більша податливість, тим кінцева величина навантаження буде меншою (точка O_4). З іншого боку, із зменшення опору (жорсткості) кріплення розміри зонування навколо виробки, а відповідно і навантаження від ваги зруйнованих порід будуть зростати (крива 1 перейде у стан 1^*). Це також видно з виразу (1.5), який визначає величину навантаження на кріплення в залежності від фізико-механічних властивостей порід і опору кріплення:

$$P = \gamma R_0 \left\{ \left[\frac{2\gamma H - \sigma_{cm}}{\beta + 2 P_k} \right]^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right\}$$

де γ – об’ємна вага порід;

R_0 – радіус кривизни склепіння;

P_k – опір кріплення;

H – глибина закладання виробки;

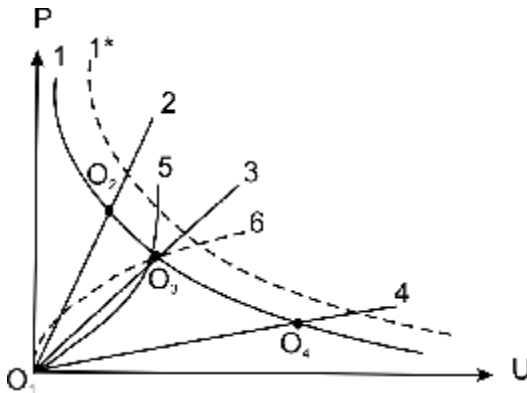


Рис. 1.9. Графік визначення оптимальної податливості кріплення

$\sigma_{\text{ст}}$ – границя міцності порідна тискання;

$\beta = 2 \sin \rho / 1 - \sin \rho$, ρ – кут внутрішнього тертя.

Таким чином, аналізуючи вплив жорсткості кріплення на величину його навантаження та розміри зони руйнування оточуючих порід, можна сформулювати принцип **оптимальної піддатливості** кріплення: оптимальною є піддатливість, при якій навантаження від ваги порід у межах сформованої області руйнування дорівнює носійній здатності кріплення. На рис. 1.9 оптимальній податливості відповідає точка O_3 , що утворена перетинанням кривої 1 та лінії, яка характеризує залежність (1.5). Оскільки через точку O_3 можна провести сімейство кривих (наприклад, 6 та ін.), то оптимальні характеристики будувати відповідати кілька конструктивних варіантів, раціональний вибір яких складає “мистецтво” проектування кріплення.

Важливою узагальненою характеристикою кріплення є його **працездатність** $A_k(U)$, яка кількісно оцінює роботу конструкції в процесі протидії проявам гірського тиску. Працездатність визначають як площу під графіком ДСХ (див. рис. 1.8). Аналітично її виражають формулою:

$$A_k(U) = \int_0^U q dx, \quad (1.6)$$

де x – поточне значення зміщень, $0 \leq x \leq U$.

Працездатність залежить від опору і піддатливості кріплення. Абсолютно жорстке кріплення має нульову працездатність. Чим більші піддатливість і опір, тим більшу роботу здійснює кріплення при взаємодії з порідним масивом. Тому в умовах значних зміщень порід ефективність конструкції забезпечує достатня величина піддатливості, але момент її реалізації повинен збігатися з максимально можливим опором конструкції, коли навантаження наближаються до величини носійної здатності елементів кріплення.

Після реалізації конструктивної піддатливості починається жорсткий режим роботи, який характеризується нерівномірним зростанням внутрішніх зусиль у відповідності до розподілу навантажень по периметру кріплення. Найбільш напруженими є ділянки, що розташовані в зоні максимальних зміщень контуру (зазвичай поблизу нормалі до напластування порід). Саме вони визначають носійну здатність кріплення, тоді як інші ділянки його периметра можуть залишатися в недовантаженому стані навіть у момент руйнації конструкції.

Оптимальним є такий розподіл зусиль матеріалу, коли в усі ділянки конструкції мають під навантаженням рівний запас міцності, наближений до граничного стану. Ефективність використання матеріалу кріплення визначають за допомогою інтегрального **показника оптимальності** конструкції:

$$K_0 = \int_0^S \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} dS \leq 1$$

де σ_i – напруження, що діє в муперерізікріплення;

σ_{\max} – максимальне напруження, що діє в найбільш навантаженому перерізіконструкції.

Чим ближче K_0 до 1, тим ефективніше використовується матеріаломісткістькріплення. За цим критерієм найбільш раціональним є анкерне кріплення, в якому K_0 наближається до 1, тоді кут опових сталеви х рамах в і н д о р і в н ю є 0,35–0,40, що свідчить про значні можливості їх конструктивного вдосконалення.

Таким чином, геомеханічні параметри кріплення: носій на здатність (опір), піддатливість (жорсткість), деформаційно-силова характеристика (ДСХ), працездатність, показники оптимальності відображають принципи взаємодії з гірським масивом, дають змогу узагальнено оцінки відповідності гірничо-геологічним умовам, указують шляхи вибору ефективних проектних рішень та напрямків удосконалення конструкцій.

Питання для самоконтролю:

1. Розкрити класифікацію підземних споруд.
2. В чому полягають функції конструкцій кріплення?
3. Які вимоги висувають до кріплення?
4. За якими класифікаційними ознаками групують різноманітні типи конструкцій? Які типи кріплення складають основні групи?
5. Чим зумовлена форма кріплення?
6. Які фактори впливають на вибір кріплення?
7. У чому полягають особливості жорсткого та податливого режимів роботи кріплення?
8. Як визначається працездатність кріплення?
9. Як оцінюють ефективність використання матеріалу конструкцій?

2. ДЕРЕВ'ЯНІ КОНСТРУКЦІЇ

Основні етапи розвитку дерев'яного кріплення. Фізичні та механічні властивості деревини. Сортамент пиломатеріалів. Типи рамних конструкцій. Вузли з'єднання елементів кріплення. Інженерне обґрунтування носійної здатності рами. Область застосування, переваги та недоліки.

2.1. Історичний експурс

Гірництво, яке започаткувало історію техніки, налічує багатотисячоліття. Сьогодні неможливо достеменно визначити, коли вперше почали використовувати деревину для запобігання обрушенню порід у гірничих виробках. Протягом тривалого часу гірничекріплення в давніх рудниках було відсутнє, або його функції здійснювали породні цілики. Найдавніші рештки дерев'яних конструкцій були виявлені археологами в копальнях IV–III тис. до Р.Х. Спочатку кріплення мало стовпчасту форму у вигляді стояків (рис. 2.1), які розміщували між покрівлею й підшовою виробки (зазвичай – в середині її прольоту). Оскільки важко точно визначити необхідну висоту стояка, то його зведення передбачало наявність нижньої опори (прокладки) з каменя або дерев'яного розклинювання стояка в покрівлі. Пізніше з'явилася Т-образна форма кріплення (між покрівлею і стояком встановлювали дерев'яну поперечину), що значно зменшило ймовірність вивалів порід.

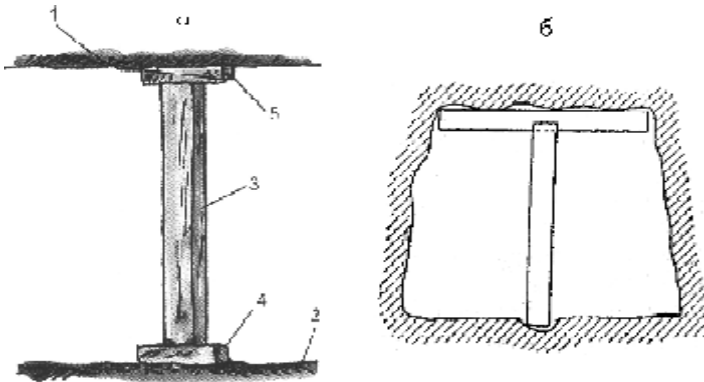


Рис. 2.1. Перші конструкції дерев'яного кріплення:

а – стояк, установлений в розріз підшови й покрівлі виробки (1 – покрівля; 2 – підшова; 3 – стояк; 4 – опора; 5 – клин); б – Т-образна конструкція

Суттєвим недоліком перших конструкцій стало перешкоджання вільному пересуванню по вузьких виробках, особливо при транспортуванні видобутих мінералів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми було вико-

ристання поперечних балок (верхняків), які закріплювали міжбоками виробки поблизупокрівлі, із створенням дерев'яногонастилу між поперечинами. Для спорудження кріплення в боковій стінці виробки робили лунку, в якій розташовували загострений кінецьпоперечини(рис. 2.2),аїї другий кінець опирали напідп'ятник на протилежній стінці, причому підп'ятник встановлювали дещо вище рівнялунки.Піддієюсилгірськоготискупідп'ятникзнаростаючимопором зміщувався по стінці, а верхняк приймав горизонтальне положення. При цьому несуча здатність поперечини зростала за рахунок дії розпірних зусиль,авиробканезахарашуваласьстояками.



Рис. 2.2. Елементи дерев'яного кріплення з поліметалічних рудників Узбекистану (V-VIII ст.)

Грунтовним етапом удосконалення кріплення ставвинахідкріпильноїрами.Стоякирамирозміщуваливбокахвиробкинезаважалипересуваннюлюдей івантажів,аверхняк(поперечина)опиравсянастоякизадопомоги особливих з'єднань. Завдяки кращимможливостямфункціонування виробок рамне кріплення набуло масовогорозповсюдження,хочаконструкція мала збільшену (у порівнянні допопередніх)матеріаломісткість.Середнайдавнішихрамнихконструкцій,щодійшлидонашогочасу,

слід відзначити знахідки давньогрецьких Лаврійських(рис.2.3)таКіпрських(рис.2.4)копальнях,якідають серединою Ітис.до Р.Х. Слід звернути увагу на невеликі розміри перерізу виробок (довжина верхняка і стояків неперевішувала 1,2м),щобулоузумовлено обмеженими технічними можливостями гірничихробіт.

У 1550 р.основоположник гірничої науки Георг Агрикола в книзі "Про гірничу справу" дав опис рамного дерев'яногокріплення

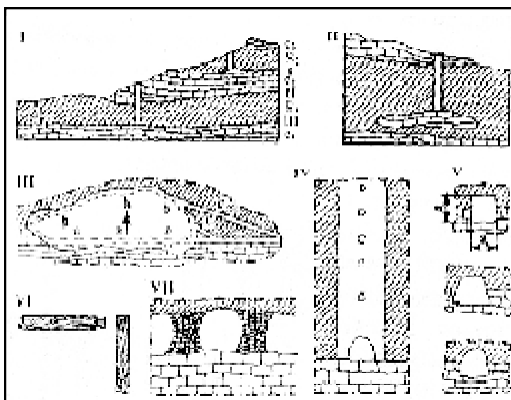


Рис. 2.3. Конструкція гірничих виробок у Лаврійських копальнях (V ст. до Р.Х.):

I – геологічний переріз; II – помилкове закладання шахти; III – камера з ходами; IV – переріз по стовбуру; V – переріз горизонтальних виробок; VI – елементи дерев'яного кріплення; VII – підпірні стовпи з пустоїпороди.

штолень (рис. 2.5), яке складалося з двохвертикальнихстояків(А),що заглиблені в підощву виробки, верхняка (В),лежня(С)ізатяжки(Е). Варто уваги, що загальні конструктивні ознаки рамногокріпленняне змінилисяз часів Агріколи (а окремі – навіть з античнихчасів)і ввійшли до сучасних технічних рішень. У книзі Агріколибули наведені також емпіричні рекомендації щодо товщини несучих елементів та відстані міжрамами.

Рис. 2.4. Археологічні знахідки дерев'яного рамного кріплення з копалень Кіпру (V ст. до Р.Х.), Німецький гірничий музей у Бохумі

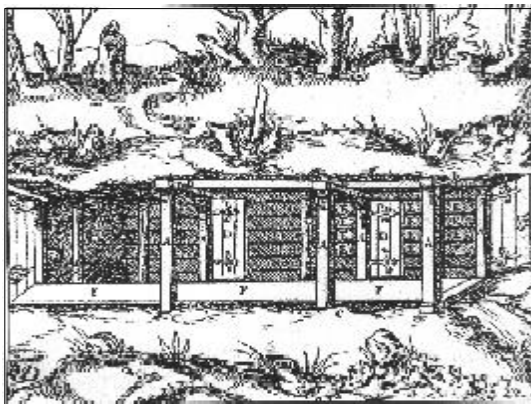


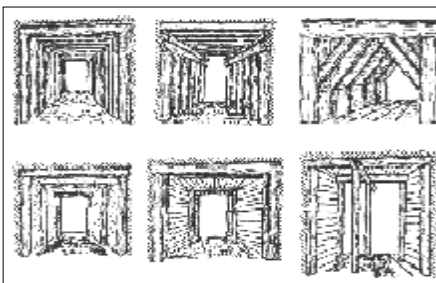
Рис. 2.5. Дерев'яне рамне кріплення штолень XVI ст. (за Агріколою)



Рис. 2.6. Дерев'яне кріплення XVII ст. (за Рьосслером)



Рис. 2.7. Дерев'яне рамне кріплення XVIII ст. (шахта Величка, Польща)



Значний інтерес являють собою конструкції середньовічного дерев'яного кріплення (рис. 2.6, 2.7), у т.ч. для виробок камерного типу, які утворювались у результаті розробки соляних брил чи рудних тіл. Тут здебільшого використовували опори у вигляді дерев'яних кострів (рис. 2.8), іноді – індивідуальні просторові конструкції каркасного типу (рис. 2.9), які здобули гучну славу мистецтву підземного будівництва.

Розвиток теорії механіки в XV-XVII ст. дозволив обґрунтувати розрахункові методи проектування будівельних конструкцій. Найбільш складну задачу дослідження міцності рамних конструкцій (рис. 2.10)

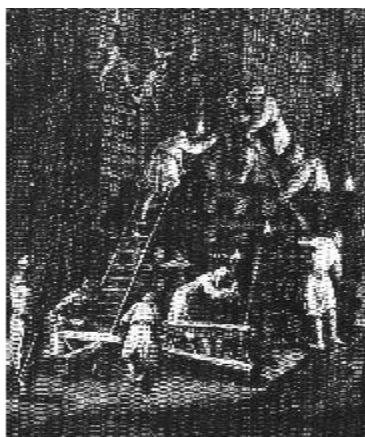


Рис. 2.8. Спорудження дерев'яних кострів у виробках соляної шахти Величка (XVIII ст.)

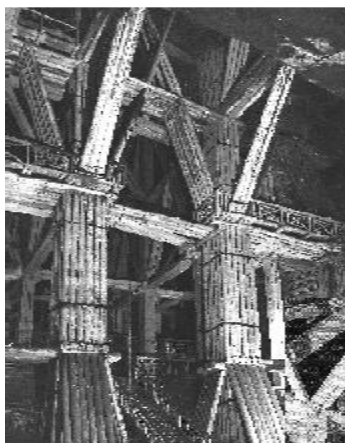


Рис.2.9.Просторове дерев'яне кріплення в камерах шахти Величка



одним з перших моделював Леонардо да Вінчі, але його праця не була опублікована і довгий час залишалася невідомою. Галілео Галілей першим дослідив роботу балки на вигин, але апріорі прийняв розподіл напружень одного

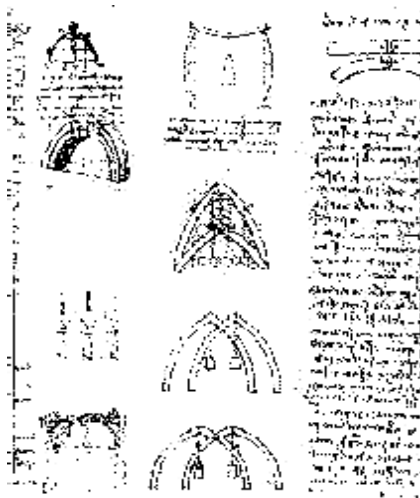


Рис.2.10. Дослідження міцності гірничих конструкцій (за Л. даВінчі)

знака на всю висоту перерізу. Едм Маріотт виправив його помилку, встановивши, що при вигині мають місце напруження двох знаків – розтягу та стиску. Роберт Гук сформулював основоположний закон лінійної залежності між зовнішнім навантаженням тіла та його деформаціями. Роботи Галілея і Маріотта були пов'язані зі значенням граничного навантаження, до якого дослідники повернулися лише в XX ст. Проте, методи будівельної механіки лише частково застосовувались до дерев'яних конструкцій підземних споруд, оскільки навантаження на кріплення залежало від змінних властивостей гірського масиву. Домінуючим при визначенні параметрів

конструкції залишався метод аналогій, який базується на попередньому досвіді підтримання гірничих виробок.

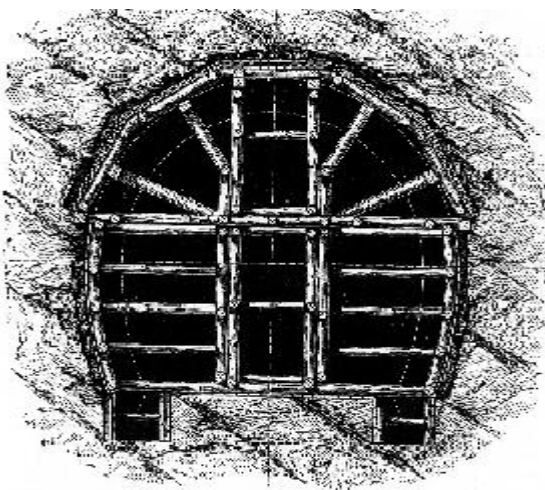


Рис. 2.11. Дерев'яні конструкції тимчасового кріплення тунелів XIX ст. (за Ф. Ржигом)



Порядз типами дерев'яного постійного кріплення створювалися різноманітні конструкції тимчасового кріплення, численні форми якого широко застосовувались при спорудженні тунелів (рис.2.11). Складність деяких конструкцій вимагала від будівельників великої професійної майстерності.

Звичайна дерев'яна рама стала своєрідним символом прохідницької праці. Учених-гірників їх колег із інших галузей науки жартівливо називають “двастояки під верхняк”, підкреслюючи цим давану простоту гірничої справи. Насправді, підземні роботи, що виконуються в умовах невизначеності багатьох параметрів, є одним із найбільш складних серед сучасних технологій.

2.2. Дерево як кріпильний матеріал

Лісоматеріали отримали достатньо широке розповсюдження при кріпленні гірничих виробок завдяки особливим якостям деревини: відносно великій міцності (тимчасовий піррозтягання для сосни з 15% вологістю складає до 120 МПа, стискання – до 40 МПа, вигину – до 45 МПа), малій масі (питома маса для сосни дорівнює близько 0,6 т/м³, що приблизно в 12,5 разів менше, ніж у сталі), легкості обробки, пружності. Високі механічні властивості деревини зумовлені тим, що стовбур дерева в процесі росту пристосовується до різноманітних зусиль, оскільки тривалий час знаходиться під дією своєї ваги та змінних за напрямком тиско-розтяжних навантажень. Слід підкреслити значну анізотропію деревини: якщо границю міцності при стисканні вздовж волокон прийняти за одиницю, то при стисканні поперек волокон вона буде дорівнювати 0,1–0,3; для умов розтягання, відповідно 2–3 та 0,3–0,5.

Із зменшенням вологості міцність деревини збільшується, тому лісоматеріали висушують, знижуючи вологість від 40% (свіжо зрізана сосна) до 15%. У гірничій промисловості використовують здебільшого хвойні породи дерева (сосну, смереку, ялицю, модрина, кедр), що зумовлено як сортаментом кріпильних матеріалів (переважна рудникових стояків), так і стійкістю проти гниття (їх висока смолистість забезпечує антисептичні властивості).

Основні недоліки деревини: низька вогнестійкість; недовговічність у підземних умовах (схильність до гниття), що обмежує строк служби конс-

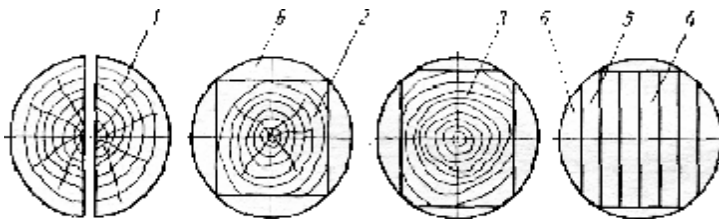


Рис. 2.12. Сортамент кріпильного лісу:

1 – пластина (розпил); 2 – чистий брус; 3 – обзельний брус; 4 – обрізна дошка; 5 – обзельна дошка; 6 – горбиль (обапіл)

трукцій 2-3-мароками; значний розкид показників вмістності. Останнє значною мірою зумовлене вадами деревини (неправильна будова, косошарість, сучки, тріщини).

Для конструкцій гірничого кріплення використовують круглий ліс та пиломатеріали. Найбільше поширення в якості несучих конструкцій отримали рудникові стояки (діаметр—від 7 до 30 см, довжина—від 0,5 до 5 м). Сортамент пиломатеріалів для рамного кріплення подано на рис. 2.12.

Збільшення строку служби деревини в шахтних умовах підвищеної вологості й температури забезпечується за допомогою попереднього просочення антисептиком (зазвичай використовують фтористий або кремнієвофтористий натрій). Просочення здійснюють у спеціальних установках способом гарячо-холодної ванни з розчином антисептика, щов 2-3 рази збільшує строк служби дерев'яного кріплення.

2.3. Базові конструкції кріплення

Дерев'яне кріплення використовують у виробках шахт та рудників із сталі помірним гірським тиском (0,06–0,08 МПа) та обмеженням (до 3-х років)

строком служби.

Основною конструкцією є трапецієвидна рама (рис. 2.13, а). Вона складається з трьох несучих елементів: верхняка 1 та двох стояків 2. Ці елементи виробляють з круглого дерева діаметром 16–30 см. Для закріплення рами в проектному положенні використовують клини 4, а міжрамний простір огорожують затяжками 3 з обох боків або розпилів. Переважне розповсюдження трапецієвидної

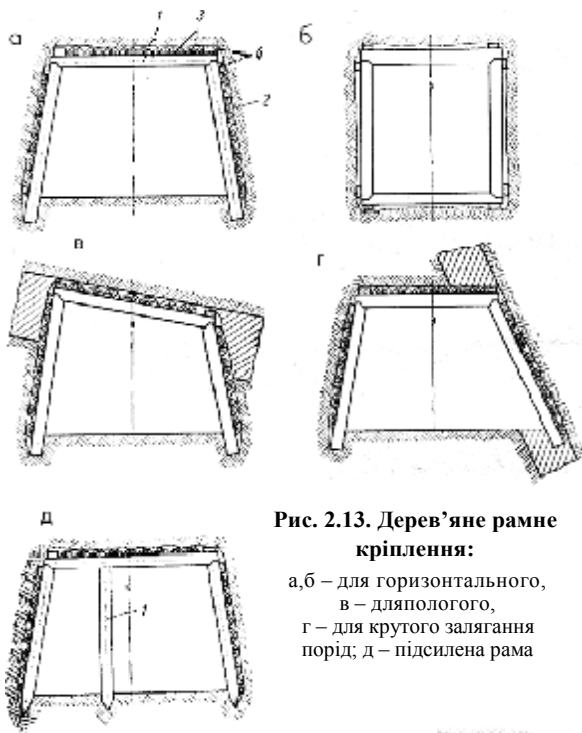


Рис. 2.13. Дерев'яне рамне кріплення:

а, б – для горизонтального,
в – для вертикального,
г – для крутого залягання
порід; д – підсилена рама

форми було зумовлене кращим сприйняттям похилою стійкою бокового тиску, а також можливостями утримання зтяжок на похилій поверхні стояків при зведенні кріплення. Кут нахилу стояків до горизонту складає близько 80° . Рами установлюють перпендикулярно повздовжній осі виробки, відстань між ними знаходиться в межах 0,5–1 м (можливе, також, суцільне розташування рам). Закріпний простір заповнюють уламками порід (забутівкою), що сприяє більш рівномірному розподілу навантажень.

У випадку деформацій порід підосви раму доповнюють четвертим елементом – лежнем, при цьому формується повна (замкнена) кріпильна рама прямокутної форми (рис. 2.13, б). У разі пологого залягання міцних порід покрівлі доцільно використовувати раму з похилим верхняком (рис. 2.13, в), а на крутому падінні стяк рами встановлюють підвисачий бік (рис. 2.13, г). Завдяки цьому використовують несучу здатність верстви порід у покрівлі пласта, а також спрощують технологію проведення штреку. Для підсилення кріплення найчастіше використовують додатковий проміжний стяк І (ремонтину), який розміщують між верхняком і підосвою виробки з максимальним наближенням до середини її прольоту (рис. 2.13, д).

Для з'єднання окремих елементів кріпильної рами використовують різноманітні типи вузлів (рис. 2.14). В випадку переважних навантажень покрівлі виробки верхняк поєднують із стояками в лапу (рис. 2.14, а, б), що забезпечує на опорі роботу повного перерізу верхняка. При основному навантаженні збоків використовують вузол (рис. 2.14, в), в якому повним перерізом працює стяк, а обмеженим – верхняк. Для тимчасового кріплення приймають поєднання елементів у паз (рис. 2.14, г). Стояки з лежнем сполучають у лапу (рис. 2.14, д), а бовзуб (рис. 2.14, е).

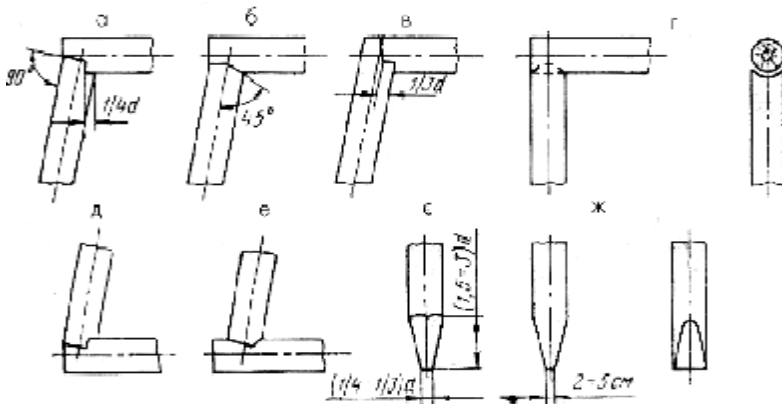


Рис. 2.14. Вузли з'єднання елементів кріпильної рами

Стояки неповних кріпильних рам установлюють у лунки глибиною 15-20 см. Для забезпечення обмеженої податливості (до 10-12 см) кінці стояків загострюють у формі піраміди чий кінчик нахил (рис. 2.14, є, ж), що дає їм можливість вдаватися в породи під дошві та частково зминатися.

Оскільки умови використання дерев'яного кріплення здебільшого передбачають відносної жорсткості та бокових порід, то надійність конструкції визначає несуча здатність верхняка. Для інженерних розрахунків допустимого навантаження на верхняк (при рівномірному його розподілі) зручно використовувати формулу:

$$P = \frac{4M}{L} = \frac{4\sigma_T W}{L} = \frac{\sigma_T \pi d^3}{8L}$$

де М – вигинний момент;

L – довжина верхняка (в типових конструкціях від 2,2 до 4,6 м)

σ_T – тимчасовий опір вигину (для деревини 40 - 45 МПа);

W – момент опору поперечного перерізу верхняка;

d – діаметр верхняка.

Так, для найбільш поширених конструкцій дерев'яного кріплення (L=3,3 м, d=0,25 м) носійна здатність рами буде дорівнювати близько 160 кН. Слід відзначити, що в реальних умовах розподілу навантаження може відрізнятися від рівномірного. У найгіршому випадку, коли зосереджене навантаження формується в центрі прольоту, носійна здатність верхняка (і кріплення в цілому) буде в 2 рази меншою, ніж при рівномірному розподілі.

Серед позитивних якостей дерев'яних конструкцій слід відзначити легкість обробки й монтажу, відносно малу масу, високий ступінь можливої деформації, що забезпечує обмежену податливість і сигналізує про небезпечний стан. Недоліками кріплення є: обмежена область застосування, втрата несучої здатності з плином часу (процеси гниття), небезпечність у пожежному відношенні, недостатня конструктивна універсальність та економічна привабливість (із-за високих цін на деревину). Сучасний стан в області кріплення виробок глибоких вугільних шахт свідчить про заміну дерев'яного кріплення більш економічними та надійними конструкціями.

Питання для самоконтролю:

1. Як проходила технічна еволюція дерев'яного кріплення?
2. Охарактеризуйте фізичні й механічні властивості деревини.
3. В яких умовах доцільно використовувати рамне дерев'яне кріплення?
4. У чому полягають конструктивні особливості різних типів дерев'яних рам?
5. Як з'єднують окремі елементи рами?
6. Як провести інженерну оцінку носійної здатності верхняка?
7. У чому полягають переваги та недоліки дерев'яного кріплення?

3. КАМ'ЯНІ (МУРОВАНІ) КОНСТРУКЦІЇ

Кріплення з природного каменю. Цегла й бетонні камені. Типи конструкцій. Їх недоліки та переваги. Податливе кріплення з бетонних блоків.

3.1. Природні та штучні камені

Природні камені (з пісковика, вапняку, вивергнених порід) були одними з перших елементів конструкцій кріплення. Уже в перші часи гір-



Рис. 3.1. Кам'яне кріплення у вигляді стовпчастої конструкції (неолітична копальня кременю у Кшемьонках, Польща)

ники при проведенні виробок отримували велику кількість природних кам'яних матеріалів (уламків гірських порід), які використовували для підтримання виробленого простору шляхом будової закладки чи спорудження стовпчастих конструкцій кріплення (рис. 3.1). У подальшому природні камені стають матеріалом мурованих конструкцій склепистої форми, які вдосконалюються внаслідок будівництва і повертаються у гірничі виробки у вигляді кам'яного кріплення (рис. 3.2). Широке впровадження склепистого кріплення спостерігалося в XVIII-XIX ст., хоча окремі виробки цього типу збереглися з часів середньовіччя. У сучасних технологіях підземного будівництва природні

камені майже не використовуються, за винятком спорудження фундаментів для мурованого кріплення з штучних каменів чи бетону.

З другої половини XIX ст. для кріплення тунелів та капітальних виробок шахт починають використовувати штучне каміння: цеглу, а пізніше бетонні камені, які в обмежених випадках застосовують і зараз. Виготовлення штучних каменів здійснюють у заводських умовах.

Типова будівельна цегла має форму прямокутного паралелепіпеда з розмірами $250 \times 120 \times 65$ мм. Її об'єм нагадує $1,6 - 1,9$ т/м³. Для кріплення використовують марку цегли не нижче 150 (тобто середня міцність не нижче 15 МПа). На 1 м³ цегляної кладки витрачають 400 шт. цегли й близько 0,3 м³ цементного розчину. Поряд із звичайною червоною цеглою застосовують клінкерну, яку отримують з тугоплавких глин шляхом випалу до



Рис. 3.2. Склеписта конструкція з природного каменю (Берггісхубель, Німеччина)

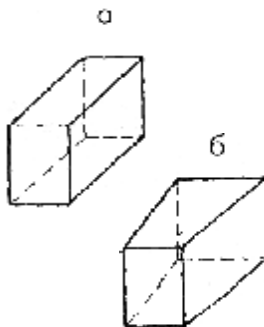


Рис. 3.3. Формикаменів:
а – для прямолінійного; б – для криволінійного контуру виробки

спікання, що зумовлює підвищену міцність (марки 400, 600, 1000).

Бетонні камені поділяють на бетоніти (вагою 20–40 кг) та блоки (100–300 кг). Використовують бетон марки не нижче В20. Міцність бетонів повинна бути завбільшки 15 МПа. Для спорудження вертикальних стін застосовують камені у вигляді прямокутного паралелепіпеда (рис. 3.3, а), а для склепистої (криволінійної) частини – у формі клиновидного призматида (рис. 3.3, б). Бетонні блоки мають наскрізні отвори для захвату робочим органом механізованого укладача, а також монтажні петлі.

3.2. Типи кам'яного кріплення

Кам'яне кріплення застосовують у тунелях чи капітальних виробках шахт поза межами впливу очисних робіт та при відсутності значних пластичних деформацій бокових порід.

Найбільш поширеним його типом були жорсткі конструкції з вертикальними стінами й склепистою покрівлею (від параболічної до циркульної форми). До появи бетонних технологій та сталевих конструкцій муроване кріплення споруджували повністю з природного каменю (див. рис. 3.2) чи цегли (рис. 3.4, 3.5). При цьому утворювали суцільну конструкцію, яка повністю закривала покрівлю й стіни виробки. Це було пов'язано з великою працемісткістю робіт і вимагало вміння зведення склепіння, що

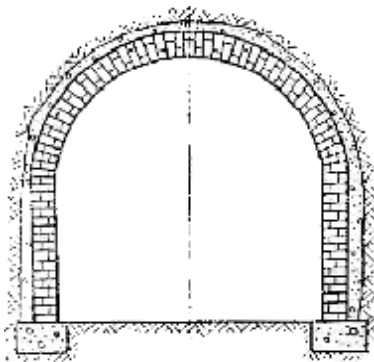


Рис. 3.4. Типова конструкція мурованого жорсткого кріплення (склепіння циркульної форми)



Рис. 3.5. Цегляне кріплення параболічної форми (Бранд-Ербісдорф, Німеччина)

протягом сторіч залишалося потайним будівельним мистецтвом. Тому пізніше почали використовувати комбіноване кріплення—стіни із штучного каміння, а покрівля—з бетону, металу, дерева тощо (рис. 3.6).

Товщина кріплення пов'язувалась з розмірами цегли й складала в типових конструкціях від 25 до 68 см (при застосуванні бетонитів чи блоків — один розмір каменя дорівнював товщині стіни). У виробках значних площ перетинів до зведення постійного кам'яного кріплення застосовували тимчасове дерев'яне (рис. 3.7), яке забезпечувало безпеку будівельних робіт. Необхідною умовою ефективної роботи мурованого кріплення була ретельна забутівка закріпного простору.

З 1930-х років почали застосовувати податливі конструкції кріплення з бетонитів, причому ефект податливості забезпечували за рахунок спеціальних прокладок між каменями. У 1970-х роках розроблена конструкція кріплення (рис. 3.8), в якій бетонити були замінені блоками вагою 200–300 кг. Довжина блоків складала 500 мм, товщина — 300, 400 або 500 мм. Для виготовлення блоків використовувався бетон марки В30. Податливість здійснювали за допомогою дерев'яних прокладок між блоками товщиною 10–40 мм, які змінювалися під дією гірського тиску. Вони виконували також функцію плоских шарнірів та знімали згинальні моменти в конструкції. Носій наспроможність кріплення сягала до 1 МПа.

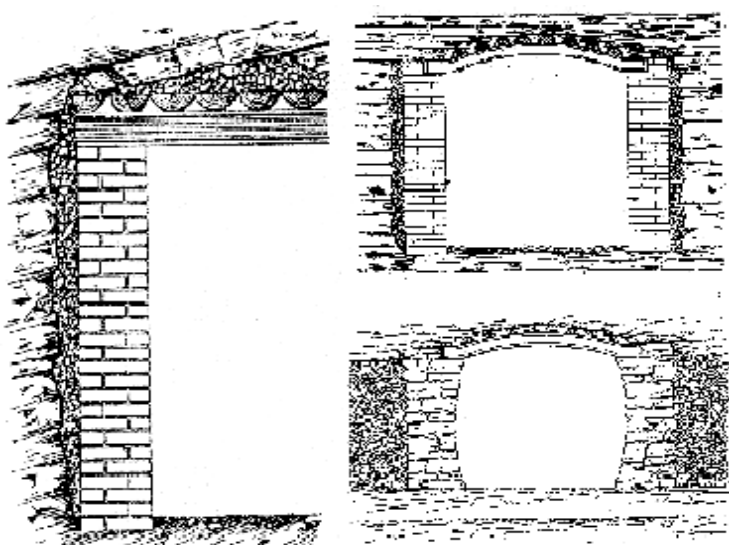


Рис. 3.6. Комбіновані конструкції кріплення з мурованими стінами

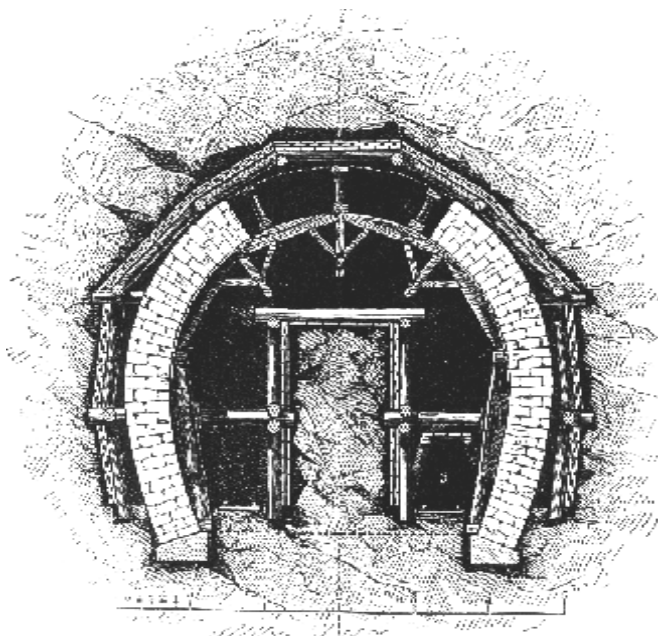


Рис. 3.7. Зведення мурованого кріплення під захистом тимчасових дерев'яних конструкцій (за Ф. Ржигом)

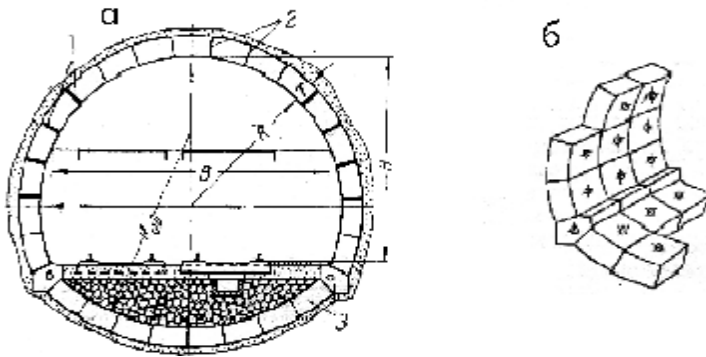


Рис. 3.8. Конструкція кам'яного податливого кріплення:

а – поперечний переріз; б – конструкція бетонних блоків

Бетонні блоки вимагають механізованого способу укладання, хоча спорудження інших типів кам'яних конструкцій пов'язане з важкою ручною працею й не є перспективним технологічним напрямком. За техніко-економічними показниками муровані конструкції поступаються сучасним технологіям монолітного та набризкового бетонування. Позитивною властивістю блочного кріплення є можливість приймати навантаження відразу після зведення конструкції.

Ідея мурованого кріплення, яка умістила в себе досвід будівництва на земній поверхні (традиційне мурування стін, зведення аркових склепінь), стала у свій час прогресивним кроком у забезпеченні стійкості підземних споруд, оскільки перші типи окремих опорних елементів (стояки, костри, рами) було замінено у відповідних умовах суцільним довговічним кріпленням, яке відігравало роль проміжної ланки на шляху до ідеї використання бетонних технологій у підземному будівництві.

Питання для самоконтролю:

1. Як почали застосовувати природні камені для кріплення гірничих виробок?
2. Дайте характеристику штучним каменям, що використовують у підземному будівництві.
3. Яка область застосування кам'яного кріплення?
4. Охарактеризуйте основні типи кам'яного кріплення, а також його комбінації з іншими конструкційними елементами.
5. Яке конструктивне рішення має податливе кріплення з бетонних блоків?
6. У чому полягають недоліки й позитивні якості кам'яного кріплення?

4. БЕТОННІ ОПРАВИ

Історія бетону. Його властивості. Особливості монолітного бетонного кріплення. Типи опалубок. Операції спорудження кріплення. Двошарова податлива конструкція. Оправа тунелів та станцій метро. Технології набризку. Параметри набризк бетонного кріплення. Його достоїнства та недоліки. Шляхи вдосконалення технології.

4.1. Конструкції з монолітного бетону

4.1.1. Історична довідка

Створення й перші спроби використання бетону датують 1834 р., хоча запатентований він був лише у 1855 р. французом Куаньє. З кінця 1840-х років розпочато спроби армування бетону дротяними сітками (перший патент на виробництво залізобетонних діжок отримав у 1867 р. французький садівник Моньє). Цікаво, що перша значна за розмірами бетонна споруда – невеликий корабель інженера Ламбо, який експонувався на Паризькій виставці 1850 р. Алевжеу 1880-і роки збірні бетонні та залізобетонні конструкції з'являються на будівельних майданчиках європейських країн, чому сприяли комплексні випробування бетону німецькими дослідниками (зокрема, М. Кеннон уперше висунув і обґрунтував ідею розташування арматури в зоні розтягання). Значний розвиток бетонних технологій був пов'язаний з винаходом у 1892 р. французьким інженером Геннебіком способу зведення монолітних конструкцій. Цей винахід визначив важливий технологічний напрямок розвитку підземного будівництва, відкрив нові можливості забезпечення стійкості підземних споруд різного призначення (ут.ч. виробок з великими поперечними перерізами).

4.1.2. Бетон як будівельний матеріал

Бетон – це штучний кам'яний матеріал конгломератної будови, який отримують шляхом змішування у визначених пропорціях цементу, піску, заповнювача (щебінь, гравій) та води. Для підземного будівництва використовують співвідношення перших трьох компонентів – 1:2:3; 1:3:5 чи 1:4:6. Грубість щебеню дорівнює 10–70 мм. Середня питома маса бетону складає 2200–2500 кг/м³. Його міцність визначається після 28 діб моменту виготовлення й залежить від активності цементу, властивостей заповнювачів, якості укладання, умов твердіння. Впливовим фактором є також водоцементне співвідношення (рис. 4.1), яке, крім міцності, визначає також пластичні властивості бетонної суміші, її легкоукладальність. Кількість води, необхідної для хімічної реакції з цементом, складає близько 20% від його

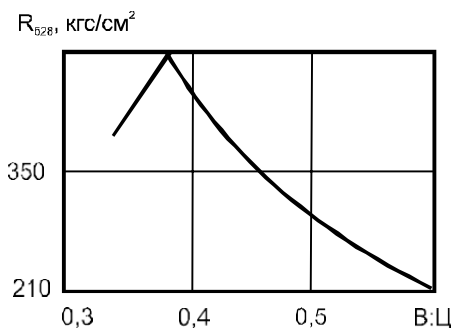


Рис. 4.1. Графік залежності міцності бетону (R_{628}) від водоцементного співвідношення (В:Ц)

маси, причому вода, що перебільшує цю кількість, випаровується в процесі твердіння бетону й утворює пори, знижуючи міцність матеріалу. Жорсткість суміші, оптимальної за водо-цементним співвідношенням, не дозволяє зручно транспортувати та укласти її за опалубку. Тому в пластичних бетонних сумішах кількість води в 1 м³ бетону складає 170-230 л, а іноді й більше (В:Ц складає 0,4–0,6). У більшості випадків в якості в'язкої ви-

користують портландцемент рядових марок (300; 400).

Міцність бетону встановлюють за залежності від величини опору на стискання атласних кубічних зразків з ребром 150 мм, що визначає клас бетону й гарантує відповідну міцність (МПа). У підземному будівництві використовують бетони класів В15, В20, В25, В30, В35, В40. В особливих випадках застосовують водонепроникні бетони, які не пропускають воду навіть при значних тисках (збільшена кількість цементу, його дрібний помел, висока однорідність суміші, наявність спеціальних додатків тощо).

Серед властивостей бетону як крипильного матеріалу слід виділити: високу міцність на стискання, проте незначний опір розтяганням та згинальним зусиллям (вони в 8–10 разів нижчі, ніж при роботі на стискання); наявність реологічних властивостей (зокрема ефекту повзучості та деформацій), а також довговічність, вогнестійкість, відносно невисоку вартість.

4.1.3. Бетонне кріплення в гірничих виробках шахті рудників

Бетонне кріплення – це суцільна жорстка конструкція, виконана з монолітного бетону за допомогою опалубки. Її застосовують для капітальних горизонтальних, похилих та вертикальних виробок зі строком служби 10 та більше років в умовах сталого рівномірно розподіленого (або близького до нього) гірського тиску.

Кріплення горизонтальних та похилих виробок (рис. 4.2) складається зі склепіння, вертикальних стінок та фундаментів (в окремих випадках включає також зворотне склепіння). Форма кріплення забезпечує роботу бетону переважно на стискання. Склепіння бетонного кріплення залежить від співвідношення його висоти (h) до прольоту (B) і поділяють на три кульне, коробове та параболічне (рис. 4.3). У вугільних шахтах використовують

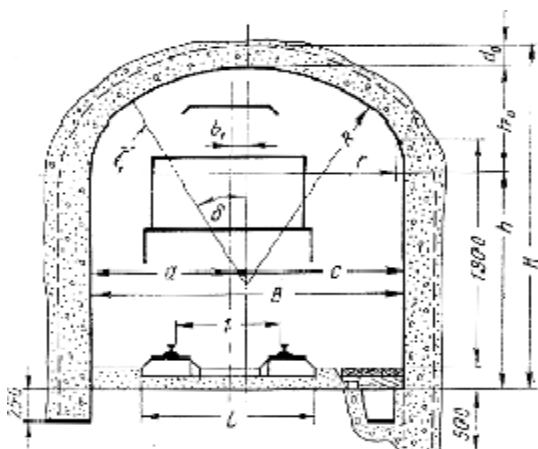


Рис. 4.2. Типова конструкція бетонного кріплення

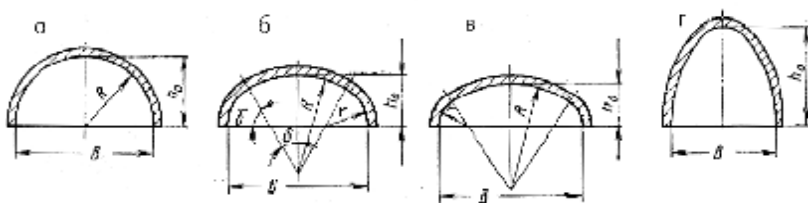


Рис. 4.3. Форми склепіння бетонного кріплення:

а – циркульне; б – коробове ($h_0/B=1/3$);
в – коробове ($h_0/B=1/4$); г – параболічне

здебільшого коробові склепіння (з підвищенням міцності порід – співвідношення h_0/B зменшується), для тунелів приймають параболічні та циркульні форми. Для стволів застосовують кільцеву форму кріплення (рис. 4.4).

Бетонне кріплення має щільний контакт (зчеплення) з оточуючими породами, тому його зовнішній контур повторює контур виробки. Проте необхідна товщина кріплення повинна витримуватися по всьому периметру, що потребує зовнішньої лінії обмеження (див. рис. 4.2, пунктир). У залежності від ширини виробки, міцності порід, стану гірського масиву товщина стін дорівнює від 200 до 500 мм, а у вершині склепіння складає $2/3$ від товщини стін (але не менше 170 мм). У скельних породах ширина фундаменту дорівнює товщині стіни, а глибина складає 250 мм або 500 мм (з боку водовідливної канавки). Мінімальна товщина бетонно-го кріплення стволів – 300 мм.

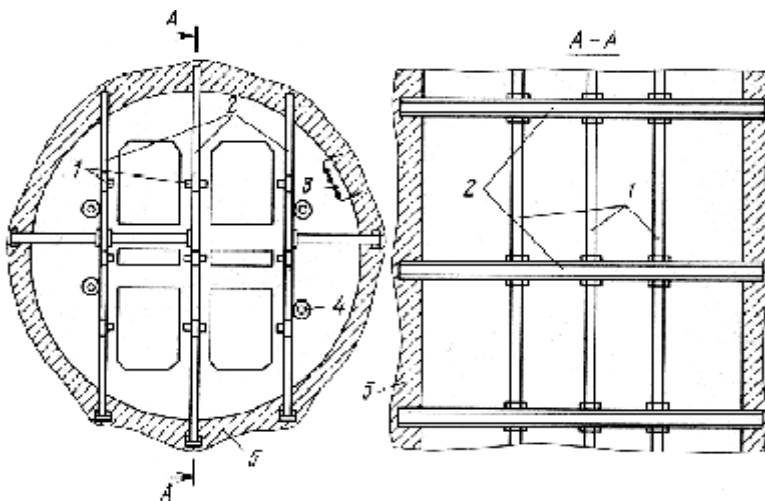


Рис. 4.4. Бетонне кріплення шахтного ствола:

- 1 – провідники; 2 – розстріли; 3 – кабелі;
4 – трубопроводи; 5 – монолітний бетон

Бетонне кріплення споруджують з технологічним відставанням від вибою (зазвичай воно не перебільшує 20 м). Зведенню бетонної конструкції передують демонтаж тимчасового кріплення й установлення опалубки (пересувної форми-конструкції, що утримує бетон до затвердіння й задає конфігурацію та розміри кріплення).

Протягом тривалого часу при будівництві капітальних виробок використовували дерев'яну опалубку (рис. 4.5), конструкція якої була значною мірою успадкована від технології зведення кам'яного кріплення (див. рис. 3.7). Недоліками дерев'яної опалубки є її громіздкість, складність і трудомісткість зведення, значні витрати лісу (при розбиранні утворюється від 20% до 50% елементів опалубки). Тому в останні десятиріччя використовують головним чином металеву опалубку у вигляді розбірно-переставних, або пересувних інвентарних конструкцій (рис. 4.6). Сутність технології застосування цих опалубок полягає в тому, що після відливу від затверділого бетону поперечні розміри опалубки зменшують, що дає можливість перемістити її по виробці. На місці бетонування опалубку знову розсовують так, що контур її приймає розміри й конфігурацію внутрішнього контуру кріплення.

Основні операції спорудження бетонного кріплення включають: приготування бетонної суміші, доставку її до місця робіт, монтаж опалубки, подачу, розподіл та ущільнення бетону в опалубці. Бетонну суміш готують

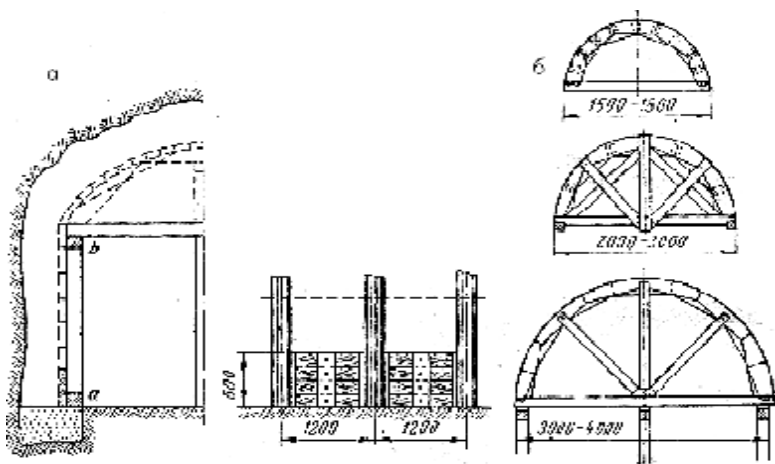


Рис. 4.5. Конструкція дерев'яної опалубки:

а – для стін; б – кружала для склепіння

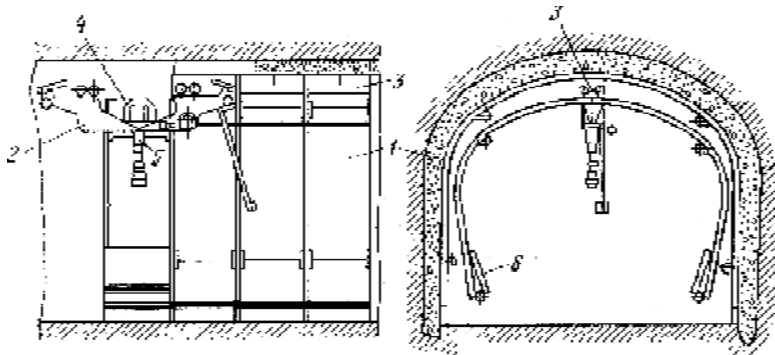


Рис. 4.6. Пересувна металева опалубка ОМП-1:

1 – секція опалубки в робочому стані; 2 – консольний візок;
3 – двотаврова балка (монорельс); 4,5 – домкратні пристрої;
6 – секція в транспортному стані

головним чином централізовані на поверхні, доставляють до місця укладання в спеціальних контейнерах, вагонетках або по трубах, а за опалубку вкладають механізованим способом за допомогою бетоновкладача (рис. 4.7). Строк твердіння бетону встановлюється проектом організації робіт, причому демонтаж опалубки проводять при досягненні бетоном 60-70% розрахункової міцності.

Серед переваг бетонного кріплення слід відзначити високу несійну здатність (незамкнуті конструкції – до 0,3 МПа, замкнуті – до 0,5 МПа),

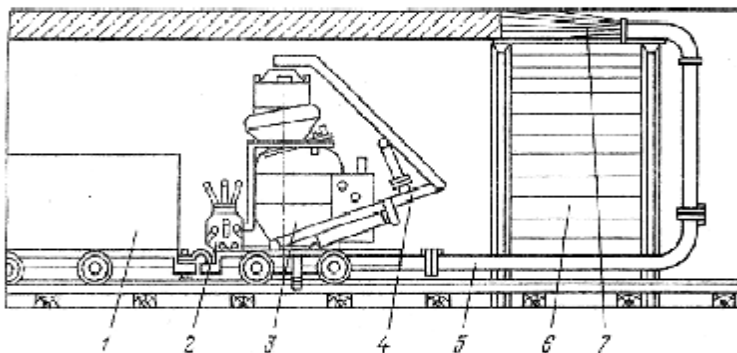


Рис. 4.7. Зведення бетонного кріплення комплексом БУК-3:

- 1 – вагонетка з бетоном; 2 – пульт управління;
3 – пневматичний бетоновкладач; 4 – завантажувальний пристрій;
5 – бетонопровід; 6 – опалубка; 7 – бетонна суміш

довговічність, водоізоляційні можливості, незначний аеродинамічний опір, можливість забезпечення різноманітної форми тощо. Донедоліків кріплення відносять неможливість сприйняття навантаження одразу після зведення, незадовільну роботу в умовах нерівномірного розподілу навантажень та зміщень порідного контуру більше 50 мм.

В умовах нестійких порід для усунення означених недоліків і розширення області застосування бетонного кріплення рекомендовано швидко-

твердні бетони підвищеної міцності, а також конструкції двохшарового монолітного податливого кріплення (рис. 4.8). У такому кріпленні внутрішній шар із звичайного бетону несучим, а зовнішній виконує функцію податливого (демпферного) елемента конструкції, який виконують з пінополіуретанового матеріалу або суміші шлаку з уламками порід. Це дозволяє більш рівномірно розподілити навантаження на бетонну оправу, забезпечити можливість зміщень порід без руйнування носійної конструкції.

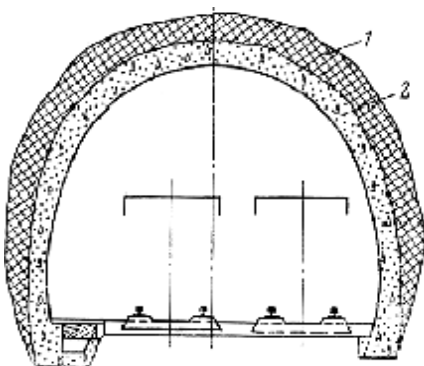


Рис. 4.8. Конструкція двохшарового податливого кріплення:

- 1 – демпферний шар;
2 – носійний бетонний шар

4.1.4. Бетонні оправи великих поперечних перерізів

Бетонні монолітні конструкції є одним з основних типів кріплення тунелів та об'єктів підземної урбаністики, які в багатьох випадках мають значні розміри поперечних перерізів. Протягом ХХ ст. в світі споруджено близько 1,2 млн. км тунелів різного призначення, більшість з яких кріпилися бетонними оправами. Серед найбільш складних об'єктів слід виділити метрополітени, залізничні та автодорожні тунелі.

Сучасні тунелі споруджують здебільшого за допомогою проходницьких щитів (пересувного кріплення циліндричної форми з передньою ножевою частиною й системою гідродомкратів). Уз'язку з цим використовують кільцеву форму кріплення з монолітно-пресованого бетону. Пресування поданої за опалубку бетонної суміші здійснюють домкратами щита в момент його пересування (рис. 4.9). У процесі пресування під тиском 1–1,5 МПа під торцем пресуючого кільця здійснюється видалення з бетонної суміші зайвої води й повітря, забезпечується повний контакт з породним контуром, що підвищує міцність кріплення приблизно на 30%.

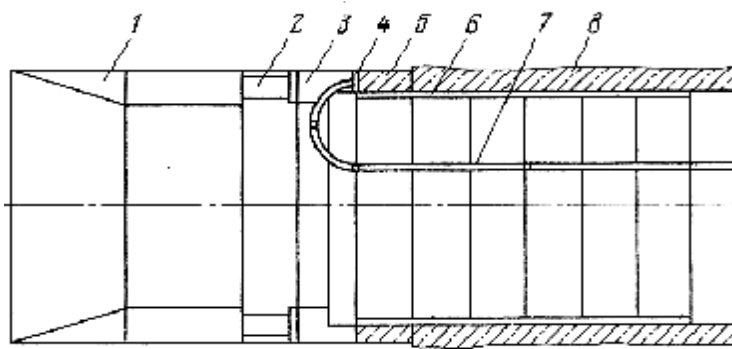


Рис. 4.9. Схема зведення монолітного бетонного кріплення способом пресування:

- 1 – проходницький щит; 2 – домкрат; 3 – пресуючий пристрій;
4 – запірний пристрій; 5 – бетонна суміш (до пресування); 6 – опалубка;
7 – бетоновод; 8 – бетонна оправа

При традиційному способі зведення бетонної оправи (див. рис. 4.7) кріплення залізничних тунелів має переважно арочну форму, причому склепіння опирається на вертикальні стіни (рис. 4.10, а) або стіни, що розширюються донизу (рис. 4.10, б); в автомобільних тунелях переважають криволінійні контури. Здебільшого використовують замкнені конструкції (плоский бетонний лоток чи зворотне склепіння). Тунелі метрополітену мають найчастіше кільцеву форму (рис. 4.11).

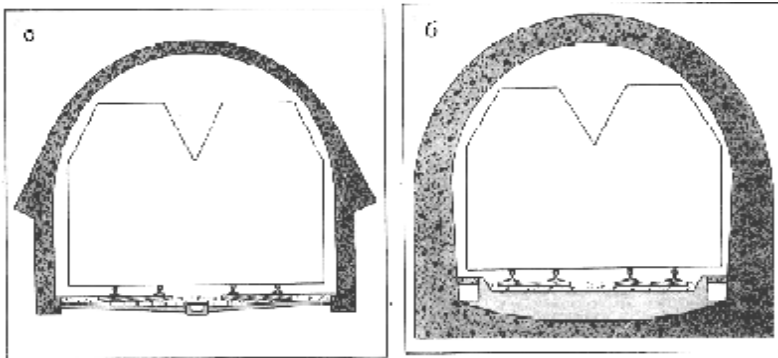
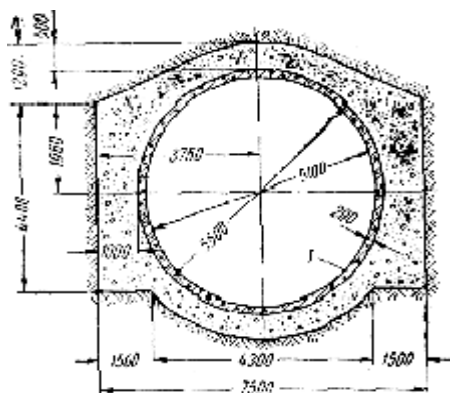


Рис. 4.10. Перерізи залізничних тунелів:
а – для стійких порід ($f \geq 8$); б – для слабких порід ($f = 3 \div 4$)



**Рис. 4.11. Типова бетонна оправа
перегінних тунелів метрополітенів**

У породах середньої міцності ($f = 6 \div 8$) товщина оправи транспортних тунелів складає 200–500 мм (в залежності від стану гірського масиву), у більш слабких породах товщина стін може сягати до 1000 мм, а склепіння – до 600 мм. Вплив розмірів тунелю на параметри кріплення регламентують вимоги, згідно з якою товщина конструкції не повинна перебільшувати 0,1 внутрішнього діаметру (прогону) тунелю. На товщину бетону впливають також вимоги щодо тріщиностійкості кріплення або можливість допущення тріщин з розкриттям до 0,5 мм. У першому випадку товщина бетону 1,5–2 рази більша, ніж у другому (тріщиностійкість може також забезпечуватись спеціальними водонепроникними бетонами).

Станції метрополітену сягають великих розмірів поперечного перерізу (30х10мібільше) та знаходяться під дією значного гірського гідростатичного тиску. У конструктивному відношенні їх проектують односклепистими - один прогін перекриває посадочну платформу колії руху поїздів, двосклепистими, що складаються з двох паралельних тунелів з посадочними платформами між коліями, та трисклепистими, які мають три паралельні тунелі, склепіння яких обпираються на спільні пілони або ряди колон. Опери останнього типу отримали найбільше розповсюдження. Уяву про форму й параметри бетонного кріплення станцій метрополітену дають рис. 4.12, 4.13.

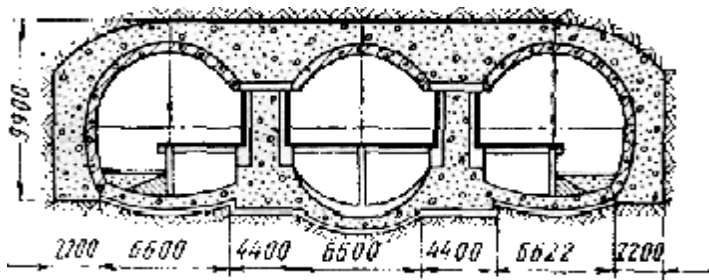


Рис. 4.12. Бетонна оправа трисклепистого станційного тунелю метро

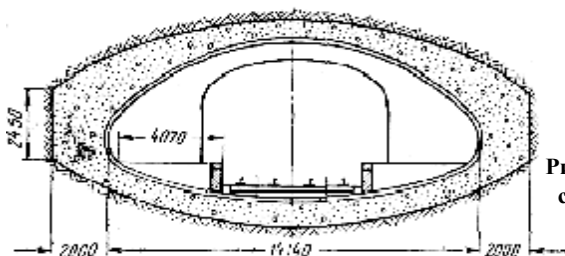


Рис. 4.13. Односклеписті станції метрополітену



4.2. Набризкбетонне кріплення

Набризкбетонце штучний кам'яний матеріал (суміш цементу, піску, гравію чи дрібного щебеню й прискорювачів твердіння), який отримують накиданням бетонної суміші на поверхню виробки за допомоги спрямованого потоку повітря (безопалубним способом). Перше повідомлення про можливість створення бетонного покриття технологією набризку (торкрету) було зроблено в 1910 р. у Нью-Йорку Д. Прентіссом, який у 1914 р. вперше використав його для кріплення гірничих виробок. Слово «торкрет» походить від скорочення двох латинських слів: «*tector*» і «*concreta*», що означає «покриваючий цементом». У 1916 р. набризкбетонну технологію впровадили в Російській імперії. Створення в 1942 р. у Швейцарії ефективних машин для набризку (так званих «цементних гармат») та розробка прискорювачів твердіння бетонної суміші сприяли широкому застосуванню безопалубного бетонування у другій половині ХХ ст.

Відмітними особливостями набризкбетону є невелика грубість зерен наповнювача (до 25 мм), введення прискорювачів твердіння (хлористий кальцій, рідке скло та ін.), формування покриття шляхом швидкісного (60–80 м/с) виходу суміші зі сопла. Спершу до поверхні виробки прилипають легкі цементні частки змочені водою. При цьому тріщини гірських порід заповнюються рідким цементним тістом на глибину до 12–15 см, а на поверхні виробки утворюється водоцементна плівка, в якій затримуються частки піску, а потім, при зростанні товщини покриття, крупні фракції наповнювача. Ця технологія забезпечує зміцнення шару прилеглих порід із залученням їх до роботи кріплення. При цьому підвищується якість самого бетону, завдяки

зменшенню в 3–4 рази його пористості (в порівнянні з монолітними конструкціями) та підвищеній складовій цементу в шарі покриття, оскільки частина грубих фракцій матеріалу вилачується при відскоку. Завдяки цьому, міцність бетону при технології набризку в 1,5–2 рази більша, ніж монолітного, що дозволяє суттєво зменшити товщину кріплення. У носійних конструкціях вона сягає близько 15 см, в запобіжних – 5–7 см (при застосуванні торкретбетону з розмірами наповнювача до 5 мм товщина ізолюючого покриття складає біля 3 см, рис. 4.14).

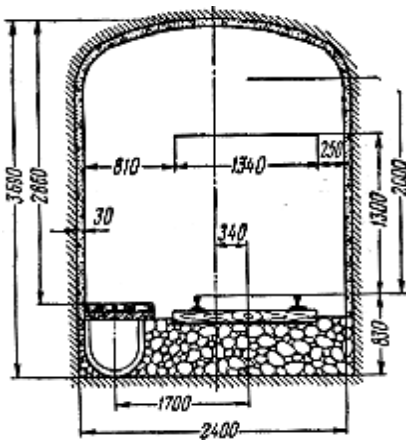


Рис. 4.14. Ізолююче кріплення відкритої виробки

Застосовують сухий (найбільш поширений) та мокрий способи формування набризкбетонного покриття. У першому випадку суху суміш завантажують спеціальну машину, доставляють до місця робіт і видують за допомогою стисненого повітря по шлангу у сопло. Перед вильотом суміш змішується з водою, яку подають в сопло по іншому шлангу. Таким чином, замішування розчину відбувається безпосередньо в момент сплати під час польоту суміші (близько 0,1 секунди). Водцементне співвідношення складає 0,4–0,5. Спосіб вимагає обов'язкового дотримання низької вологості вихідних компонентів (не більше 2–3%). Відскок матеріалу від поверхні виробки сягає 20–25%, при використанні прискорювачів твердіння він зменшується до 10–15%.

Примокрому способі компоненти бетону разом з водою завантажують у змішувач, у якому готують бетонну суміш. За допомогою насосу її подають по трубах у сопло, куди надходить прискорювач твердіння (рідке скло) та стиснене повітря. Водцементне співвідношення складає 0,7–0,8; відскок матеріалу – до 10%. Мокрий спосіб використовують здебільшого при гідроізоляції сталевих і бетонних конструкцій з залізобетонними з'єднаннями для наступного тампонажу закріпного простору.

Роботи по зведенню набризкбетонного кріплення виконують за допомогою спеціальних машин, які за конструктивними ознаками поділяють на камерні, барабанні і шнекові (рис. 4.15). Набризкбетон накладають горизонтальними смугами знизу доверху з товщиною одночасно сформованого шару до 5 см в обох напрямках до кріплення. Кожний наступний шар слід наносити не раніше ніж через 2 години. У разі застосування прискорювачів твердіння товщину шару можна збільшувати в 2–3 рази, а розрив між повторним бетонуванням скоротити до 30–40 хвилин. Протягом тижня бетонну поверхню треба змочувати розпиленням струменем води (1–2 рази на добу).

Область застосування набризкбетону – це ізолюючі та побіжні покриття, тимчасові й комбіновані кріплення (особливо ефективні в сполученні з анкерами), несучі конструкції тунелів та шахтних виробок (поза зоною впливу очисних робіт). Самостійне використання набризкбетону у виробках вугільних шахт Донбасу допускається, якщо величина критерію

проф. Ю.З. Заславського ($\gamma_{\text{H}} / \sigma_{\text{ст}}$) не перебільшує 0,3.

У сучасному підземному будівництві широке застосування набризку завдячує кільком важливим перевагам даної технології:

- універсальність застосування в широкому діапазоні гірничо-геологічних умов;
- відсутність опалубки, високий рівень механізації робіт;

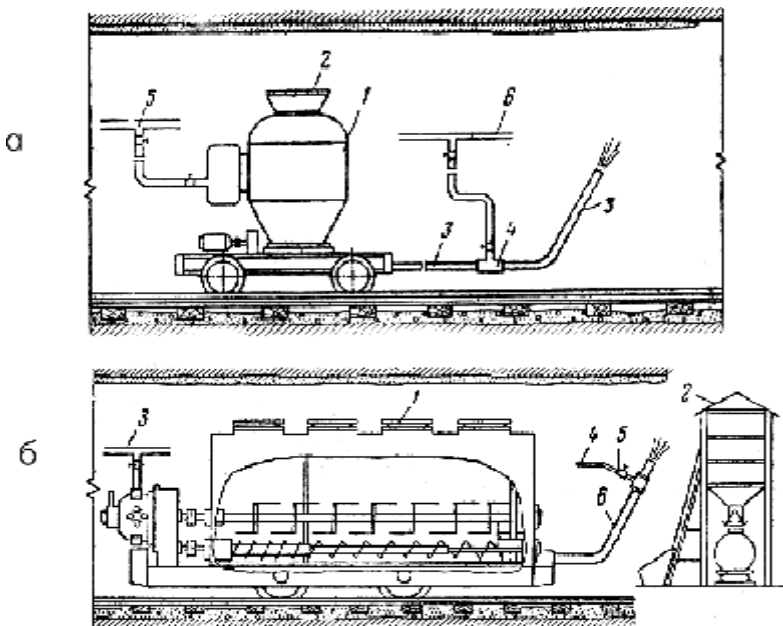


Рис. 4.15. Технологічні схеми набризку:

- а – із застосуванням машини БМ-60 (1 – машина камерного типу;
2 – сито 25х25 мм; 3 – матеріалопровід; 4 – змішувач;
5 – магістральний повітропровід; 6 – магістральний водопровід);
б – із застосуванням машини ПБМ (1 – машина шнекового типу;
2 – завантажувальний пристрій; 3 – повітропровід; 4 – водопровід;
5 – змішувач; 6 – матеріальний трубопровід)

- значна ефективність і економічність конструкції (завдяки механічній міцності матеріалу залученню оточуючих порід у робочу крипку);
- швидке включення в роботу (оскільки кріплення споруджують слідом за просуванням вибою, без допущення розшарування порід);
- надійне запобігання руйнації й вивітрюванню порід;
- низький аеродинамічний коефіцієнт, водонепроникні властивості, сигналізація небезпечного стану (поява тріщин) й простота підсилення шляхом додаткового набризку.

До недоліків технології відносять:

- значні (до 25%) втрати бетонної суміші в результаті відскоку від поверхні виробки;
- висока запиленість рудничного повітря, що потребує використання засобів індивідуального захисту;
- у разі “рваного” контуру виробки, навіть при додатковому згла-

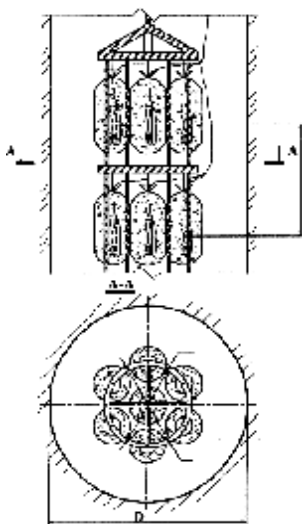


Рис. 4.16. Схема розташування мішків з цементною сумішшю та зарядами ВР для нанесення набризку вибуховим способом

глядку споруді. У Донецькому технічному університеті розроблена безлюдна технологія нанесення набризку за допомогою енергії вибуху (рис. 4.16), яка зводить до мінімуму всі шкідливі фактори одночасно.

У НТУУ «Київський політехнічний інститут» розроблена перспективна конструкція кріплення з монолітно-пресованого бетону, яка утворюється безопалубним способом шляхом роликового ущільнення бетону по периметру контура виробки обертальним планетарним пристроєм з системою роликів.

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягають особливості бетону як будівельного матеріалу?
2. Дайте характеристику конструктивним ознакам монолітного бетонного кріплення шахт і рудників.
3. В чому полягає призначення опалубки бетонного кріплення? Які типи опалубок використовують в підземному будівництві?
4. Опишіть технологію зведення монолітного бетонного кріплення.
5. Які особливості мають бетонні опалубки в виробках великих поперечних розмірів (транспортних тунелів, станцій метро)?
6. Вкажіть відмітні особливості набризку бетону.
7. Охарактеризуйте технологічні способи зведення набризку бетонного кріплення.

джуванні різких нерівностей, важко забезпечити необхідну товщину й надійність роботи кріплення, а його естетичний вигляд поступається монолітним конструкціям.

Для підвищення міцності матеріалу на розтягання в склад бетонної суміші вводять армуючі елементи у вигляді сталевих (зрідка капронових) волокон довжиною 15-30 мм, діаметром 0,4-0,8 мм. Зниження вмісту пилу при способі сухого набризку досягають шляхом створення водяної зависи в зоні робіт. В Японії в бетонну суміш додають особливі знепилювальні добавки, які забезпечують прийнятну границю пилоутворення 5 мг/м³. Японські конструктори створили автоматизований комплекс для виготовлення й набризку бетонної суміші з дистанційно керованим соплом на стрілі самохідного екскаватора. У Німеччині та Японії створені пристрої для ущільнювання та загладжування поверхні бетону, що підвищує якість кріплення й додає естетичного вигляду споруді.

5. ЗАЛІЗОБЕТОННЕ КРІПЛЕННЯ

Монолітний залізобетон. Гнучке й жорстке армування. Особливості металобетонних конструкцій. Рамне залізобетонне кріплення. Конструкції з універсальних ребристих та плоских плит. Тюбінги. Принципи роботи тюбінгового кріплення. Його типи й технологія монтажу.

5.1. Монолітний залізобетон

В умовах значного гірського тиску (до 0,3–0,4 МПа), нерівномірного розподілу навантажень, значних прогонів виробок (більше 6 м) і тривалого строку їх експлуатації, а також на ділянках сполучень капітальних виробок доцільно застосовувати монолітне залізобетонне кріплення. Воно має ті ж самі конструктивні рішення та форму, що й бетонне, але додатково вміщує армуючі елементи у вигляді гнучкої стержневої арматури або рам із сталевого прокату.

Залізобетонне кріплення з гнучкою арматурою (рис. 5.1) споруджують у випадку, коли геомеханічна ситуація дозволяє звільнити частину виробку від тимчасового кріплення, що дає можливість встановити татам арматурні каркаси, опалубку й провести бетонні роботи. Зазвичай використовують подвійну арматуру, яку розташовують поблизу зовнішнього та внутрішнього контуру кріплення з урахуванням захисного шару 1,5–2 см. Відстань між прутами робочої арматури складає 20–30 см, діаметр стержнів – 8–25 мм. Коефіцієнт армування конструкції дорівнює близько 1–1,5 %. Використовують пластичний бетон, який вимагає мінімальних зусиль для уцілювання.

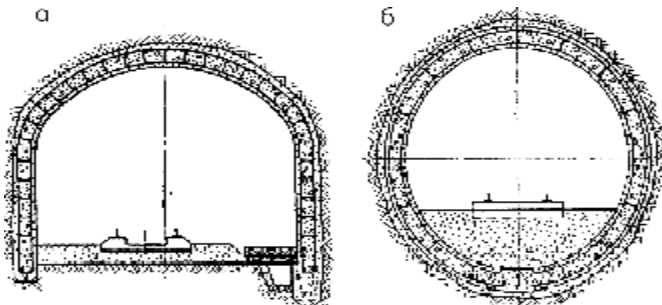


Рис. 5.1. Залізобетонне кріплення з гнучкою арматурою:

а – склеписта форма; б – кільцева форма

У більшості випадків при спорудженні капітальних виробок відсутня можливість демонтажу тимчасового рамного кріплення навіть на короткий проміжок часу. Тому в практиці будівництва капітальних виробок (зде-

більшого приствольних дворів) значно розповсюдження отримало залізо-бетонне кріплення з жорсткою арматурою (т. зв. “металобетонне”). Застосовують два варіанти кріплення: з жорсткими рамами із двотавру (рис. 5.2) та з тимчасово податливими рамами із жолобчастих профілів (рис. 5.3).

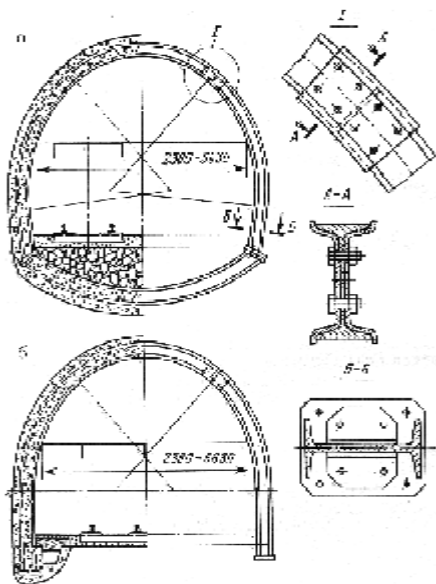


Рис. 5.2. Металобетонне кріплення з жорсткими рамами із двотавру:

а – КДЗ; б – КДА

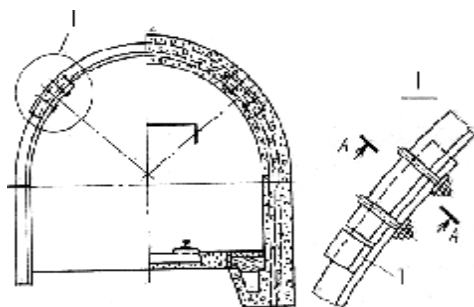


Рис. 5.3. Металобетонне кріплення із спецпрофілю:

1 – обмежувач податливості

У першому випадку сталеві арки монтують слідом за просуванням вибою з інтервалом 0,5–0,7 м, а бетонування ведуть паралельно з прохідницькими роботами з невеликим відставанням від просування вибою. У разі інтенсивних зміщень порід бетон не встигає набрати необхідної міцності, структурні зв'язки між породним контуром, бетоном, затяжками і рамами кріплення порушуються, конструкція руйнується. Вести процес бетонування із запізненням (на час реалізації основних зміщень порід) не завжди можливо, оскільки тимчасові жорсткі рами в цьому випадку деформуються, а виробка може опинитися в аварійному стані. У зв'язку з цим частіше використовують комбінацію бетону з податливим кріпленням із спецпрофілю (див. рис. 5.3). При цьому арки працюють у податливому режимі до припинення інтенсивних зміщень порід (1–1,5 місяці), після чого (зазвичай на відстані 40–50 м від вибою) їх бетонують.

Слід зазначити, що металобетонне кріплення має

найбільшу матеріалоємність, вимагає великих трудовитрат, не може забезпечити високих темпів спорудження виробок. Недоліком конструкції є неузгоджена робота її елементів (бетон і сталеві рами), механічні властивості яких не відповідають один одному. Суттєву конкуренцію металобетонному кріпленню складає система “арка-набризк-тампонаж”, яка ефективно впроваджена на багатьох шахтах України (див. розділ 8).

5.2. Збірний залізобетон

Широке впровадження уніфікованого збірного залізобетону в промисловотавільнебудівництво(60–70рокиXXст.)привело до багатьох спроб застосування збірних ЗБК упідземних спорудах, зокрема увиробках вугільних шахт. Перспектива цього типу кріплення пов’язувалась з такими його якостями як: можливість сприймати навантаження відразу після монтажу, відмова від тимчасового кріплення, індустриальне виробництво елементів у заводських умовах (висока продуктивність праці та якість конструкцій), довговічність, безпечність упожежному відношенні, можливості забезпечення заданої несучої спроможності та обмеженої податливості.

Випробування практикою підземного будівництва пройшла лише невелика частина численних розробок, що пов’язано з великою вартістю кріплення, складністю виготовлення й транспортування конструкцій, відсутністю зручних засобів механізації їх монтажу, а головне – низькою ефективністю робіт в умовах невизначеного рівня розподілу навантажень (недостатні адаптивні можливості).

Збірне залізобетонне кріплення поділяють на дві групи: конструкції рамного типу, які становляють в розгін, та конструкції панельного (тубірного) типу, що створюють суцільне кріплення.

5.2.1. Рамні конструкції

Для кріплення однокільних виробок невеликої площі поперечного перерізу (до 8 м²), споруджених у відносно стійких породах (без впливу очисних робіт), іноді застосовують трапецієвидне або прямокутне рамне кріплення із збірних залізобетонних елементів.

Кріплення у вигляді чотирьохшарнірної рами складається з верхняка, двох стояків та затяжок прямокутного суцільного перерізу (рис. 5.4). Їх маса, відповідно, складає 180 кг, 160 кг та 24 кг, що потребує засобів механізації монтажу кріплення. Витрати бетону на 1 виробку – 0,6 м³, металу – 114 кг. Поєднання верхняка із стояками виконано плоским і здійснюється за допомогою консольного уступу на верхняку, який перешкоджає верхньому кінцю стояка зміщуватися у виробку. Обмежена податливість може здійснюватися за рахунок зминання дерев’яних прокладок, які розташовуються на верхніх кінцях стояків під верхняком.

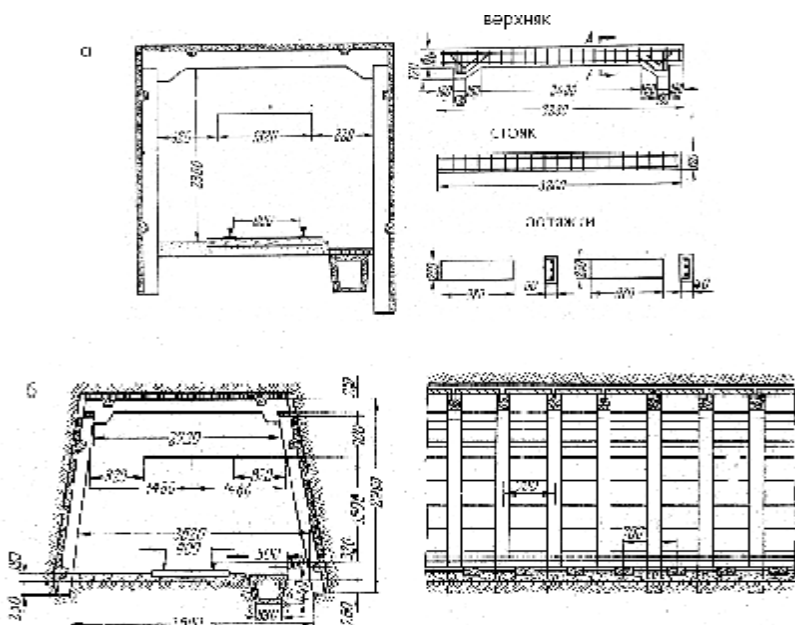


Рис. 5.4. Конструкція рамного залізобетонного кріплення із суцільних елементів:

а – прямокутна форма; б – трапецієвидна форма

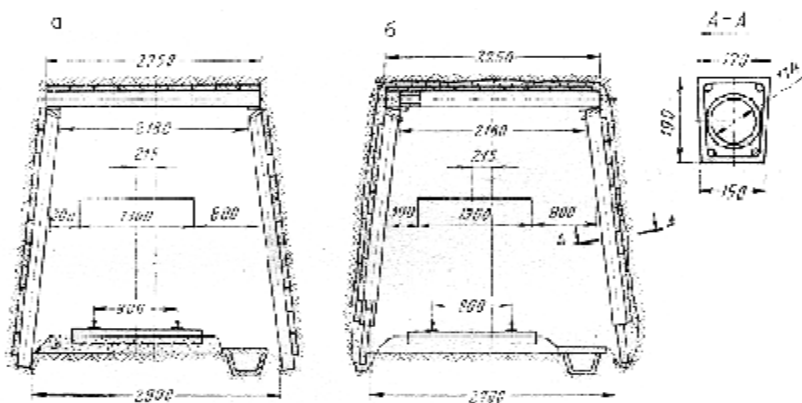


Рис. 5.5. Кріплення із залізобетонних пустотілих елементів:

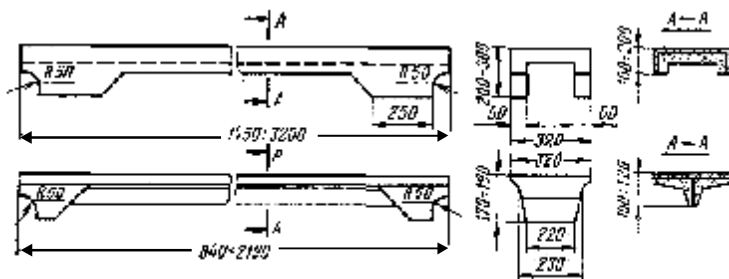
а – жорстка конструкція; б – податлива конструкція

Більше економічний і ефективний виявилися конструкції з пустотілих елементів (рис. 5.5), в яких верхня кістка має однаковий переріз внутрішньої ексцентрично розташованою порожниною. У багатьох випадках залізобетонний верхняк замінюють на сталевий із двутавра. Податливість кріплення здійснюють шляхом вставлення в нижні кінці стоек дерев'яних вкладишів, діаметр яких на 5–10 мм перебільшує діаметр отворів. Податливість реалізується при навантаженні стоек близько 80 кН.

Розроблялися також залізобетонні рамні конструкції арочної та еліптичної форми, але вони не витримали конкуренції з сталевими податливими рамами, які в аналогічних умовах забезпечували більшу надійність гірничих виробок.

5.2.2. Суцільні конструкції з панелей аботюбінгів

На першому етапі впровадження збірного залізобетону найбільше розповсюдження отримали конструкції з універсальних ребристих плит (рис. 5.6), але досвід експлуатації виявив недостатню їхню спроможність при великій трудомісткості монтажу й вартості кріплення. Тому використання цих конструкцій слід розглядати лише як історичний етап розви



тку інженерної думки в підземному будівництві.

Рис. 5.6. Залізобетонні ребристі плити

Певне підвищення несучої спроможності й економічності кріплення, а також суттєве поліпшення його аеродинамічних властивостей було досягнуто застосуванням плоских пустотілих попередньо напружених конструкцій у вигляді панелей (плит). Їх розміри складали: ширина 500 або 320 мм, товщина – 120 або 100 мм. Використовувався бетон марок 400 та 600, арматура з високоміцного дроту. У вузлах сполучення елементів встановлювали фасонні залізобетонні вкладиші. Одноколіїні виробки мали трапецієвидну форму, двоколіїні – полігональну (рис. 5.7). Кріплення з плоских плит забезпечувало надійну роботу лише в умовах рівномірного розподіленого навантаження на його елементи, мало дуже обмежену область застосування.

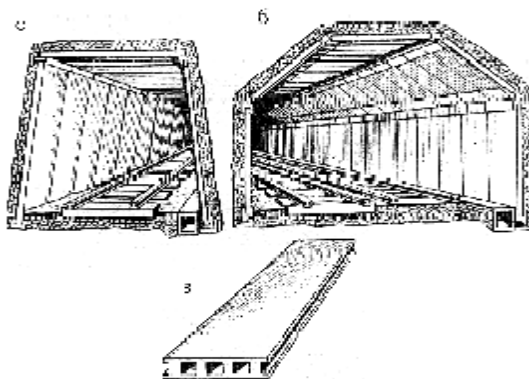


Рис. 5.7. Виробки, закріплені конструкціями з універсальних плоских плит:

а – трапецієвидна форма; б – полігональна форма; в – елемент кріплення

Для капітальних виробок, які споруджують у тяжких гірничо-геологічних умовах, замість традиційного металобетону, можливо застосовувати блочне залізобетонне кріплення (рис. 5.8), яке забезпечує носійну здатність до 0,6 МПа. Кріплення зводять безпосередньо за просуванням вибою за допомогою спеціального піднімального крана, тампонаж закріпного простору здійснюють цементно-піщаним розчином у співвідношенні 1:3. Витрати матеріалів на 1 м виробки площею поперечного перерізу 14,3 м² складають: бетону – 1,9 м³, металу – 280 кг.

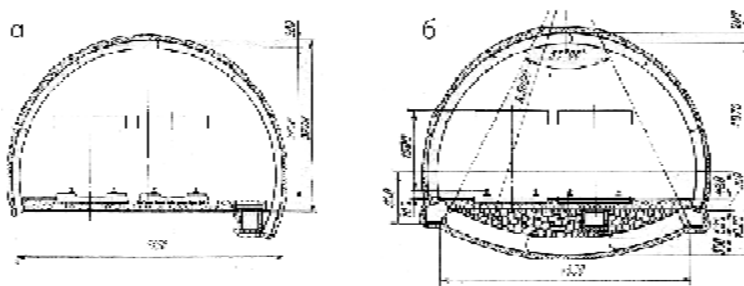


Рис. 5.8. Блочне залізобетонне кріплення:

а – базова форма; б – конструкція із зворотним склепінням

Для складних гірничо-геологічних умов, що характеризуються значним (до 0,4 МПа) всебічним тиском гірських порід, розроблені конструкції тубінгового залізобетонного кріплення, яке застосовують у вертикальних,

горизонтальних та похилих (до 25°) гірничих виробках. Тюбінгове кріплення (рис. 5.9) – це суцільна конструкція криволінійного обрису, що складається з щільно укладених один до одного циліндричних сегментів (тюбінгів), які мають з одного боку поздовжні та поперечні ребра жорсткості, а з іншого – гладку поверхню плити, що контактує з забутівкою і породним контуром. Примикування тюбінгів по периметру кріплення здійснюється по криволінійних поверхнях різної кривизни, завдяки чому тюбінги можуть під дією зовнішнього навантаження повертатися на деякий кут, що веде до певної зміни форми кріплення, забезпечує можливість пристосування до нового стану статичної рівноваги масиву порід.

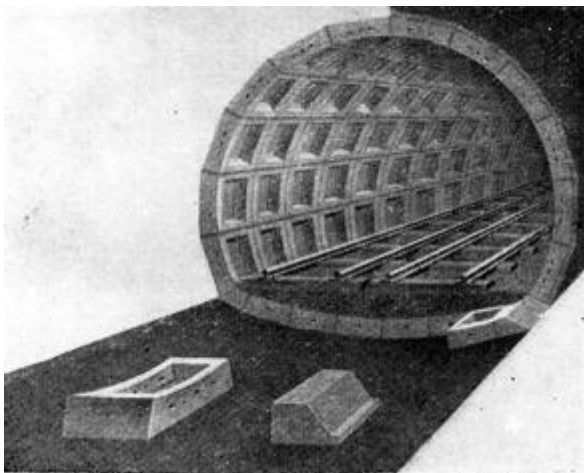


Рис. 5.9. Кріплення з дрібнорозмірних тюбінгів

Вперше тюбінгове кріплення було введено в експлуатацію на шахтах України в 1911 р. (металеві тюбінги), а широке використання залізобетонних тюбінгів для виробок шахт (польові штреки), метрополітенів та колекторних тунелів розпочато в 50-х роках ХХ ст. Застосовували дрібнорозмірні ($630 \times 500 \times 245$ або $860 \times 500 \times 299$) та, у менш складних умовах, великорозмірні тюбінги з несучою здатністю $0,1 - 0,2$ МПа. Тюбінги армуються зварним каркасом (рис. 5.10), який складається з верхньої та двох торцевих сіток, причому робоча поздовжня арматура має діаметр 10 мм, допоміжна – 6 мм. Витрати арматурної сталі на 1 м виробки ($S = 13,4 \text{ м}^2$) складають – 116 кг, бетону – $0,8 \text{ м}^3$. Маса ребристого тюбінга – $120 - 180$ кг.

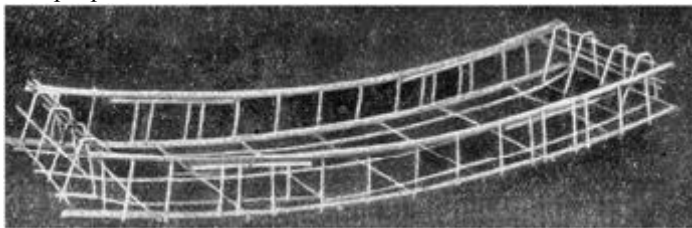


Рис. 5.10. Арматурний каркас ребристого тюбінга

Крім ребристих використовують конструкції з гладкостінних тюбінгів (рис.5.11) типу КТАГ та ГТК, які мають значно менший коефіцієнт аеродинамічного опору, але збільшені на 20 – 30 % витрати бетону на метр виробки. Ширина таких тюбінгів дорівнює 750 або 1000 мм, довжина зумовлена розміщенням цілого числа тюбінгів при кріпленні повним кільцем (1600-1800 мм), а маса сягає 400-500 кг.

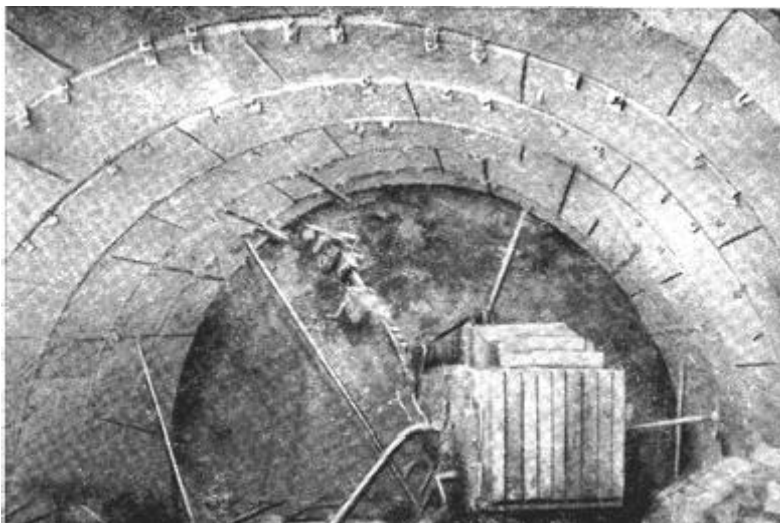


Рис. 5.11. Кріплення КТАГ із гладкостінних тюбінгів

Монтаж тюбінгового кріплення (рис. 5.12) здійснюють за допомогою спеціальних укладачів або піднімальних кранів. На першому етапі впровадження залізобетонних тюбінгів їх зводили з відставанням від просування вибою виробки на 40–50 м, використовуючи тимчасове кріплення у вигляді сталевих рам. У подальшому основною технологією став монтаж тюбінгів безпосередньо у вибої на відстані, що не перебільшує 3 м. Перші дві смуги тюбінгів укладають на сталевому арочному шаблоні. Окремі елементи поєднують поміж собою в поздовжньому напрямку за допомогою монтажних болтів, які пропускають у отвори в ребрах тюбінгів (в гладкостінних конструкціях застосовують спеціальні металеві вушка, приварені до арматурного каркаса). Як правило роблять перев'язування швів прилеглих тюбінгових смуг (арок), для чого розміщують у підосві виробки поперечні тюбінги: водний смуг зліва, у другій – справа. Забутовування закріпного простору уламками порід здійснюють рівномірно з обох боків виробки. Перспективним напрямком вдосконалення тюбінгового кріплення є тапонаж закріпного простору цементними сумішами (окремі конструкції тюбінгів передбачають спеціальні отвори для ін'єкції розчину).



Рис.5.12.Монтажтюбінговогокріплення:

а – арочна форма (польовий штрек);
б – кільцева форма (тунель метрополітену)

Слід відзначити, що в умовах всебічного значного тиску гірських порід замкнене(кільцеве)тюбінговекріплення забезпечує надійну й ефективну роботу (витрати матеріалів у порівнянні з металобетонними конструкціями скорочуються в 2-2,5 рази).Небезпекуявляютьсобойо випадки концентрації навантаження на окремихділянках, які призводять до руйнування1–2тюбінгів,після чого спрацьовує т. зв. “принцип доміно”: руйнація прилеглих елементів, аварійний стан виробки. Перекріплення та підсилення тюбінговихконструкційє дуже складним процесом й у багатьох випадках неприпустиме. Вирішальнимиумовами ефективного й безпечного застосування тюбінгів є достовірне

прогнозування геомеханічної ситуації навколо виробки.

Питання для самоконтролю:

1. В яких гірничотехнічних умовах застосовують монолітний залізобетон?
2. Коли використовують гнучке армування залізобетонного кріплення, а коли жорстке?
3. У чому полягають особливості роботи металобетонного кріплення?
4. Дайте характеристику рамних залізобетонних конструкцій.
5. Які конструктивні особливості має кріплення з плоских залізобетонних панелей(плит)?
6. Дайте визначення тюбінгового кріплення. Охарактеризуйте його типи.
7. Опишіть технологію монтажу тюбінгового кріплення.

6. СТАЛЕВЕ РАМНЕКРІПЛЕННЯ

Жорсткі, шарнірні й податливі конструкції. Типи шахтних профілів. Вузли податливості. Міжрамні огорожі. Стяжки. Клини. Забутівка. Типи арочно-го та трапецієвидного кріплення. Технологія “Буллфлекс”. Спрямована податливість. Розпір рам. Перерозподіл матеріалу по периметру. Попереднє напруження елементів.

6.1. Історична довідка

У 1783 р. англійський металознавець Г. Корт отримав патент на “винахід способу прокату фасонного заліза за допомогою особливих вальців”. Уже на початку XIX ст. прокату (як способу обтискання й надання металу необхідної форми) почали віддавати перевагу перед куванням, оскільки продуктивність праці, якість металу й ефективність формоперетворення різко зросли. Бурхливий розвиток металопрокату був пов’язаний з будівництвом залізниць і виготовленням великої кількості рейок. Перший прокатний стан (усучасному розумінні) збудовано на заводах Круппа (Німеччина) у 1854 р., а наступне десятиріччя підприємства випускає рейки та будівельні балки, з’явилися в багатьох країнах Європи та США.

Уже в 1860-х роках у Німеччині та Чехії ведуться спроби використання металевих рейок в якості елементів кріплення гірничих виробок, спершу – у вигляді окремих верхняків, пізніше – трапецієвидних рам (за аналогією до дерев’яних конструкцій). Перший позитивний досвід використання металевих кріплень на малих глибинах привів до широкого впровадження жорстких конструкцій кріплення з рейок і двотаврів трапецієвидної, а також і трапецієвої форми (рис. 6.1, а, б, в). Для з’єднання елементів кріплення використовували плоскі та фігурні планки (рис. 6.2, а), які забезпечували нерухому фіксацію носійних елементів, зміщення яких були можливі тільки за рахунок руйнівного деформування конструкції. При переході на значні глибини, в умовах інтенсивних зміщень гірських порід жорсткі конструкції сталевих рамного кріплення виявилися неможливо забезпечити стійкість виробок. Науково-технічна думка початку XX ст. дотримувалася погляду про нецільність використання сталевих прокатних матеріалів для шахтного кріплення.

Для подолання такої ситуації було проведено якісне вдосконалення конструкції, спрямоване на збільшення працездатності й адаптації до можливої зміни контуру виробки. На першому етапі (1924 р.) у конструкцію арочно-го кріплення були введені додаткові шарніри (рис. 6.1, г; 6.2, б, в), які забезпечували повертання й обмежені зміщення несучих елементів в площині рами, що зменшувало нерівномірність розподілу зовнішніх наванта-

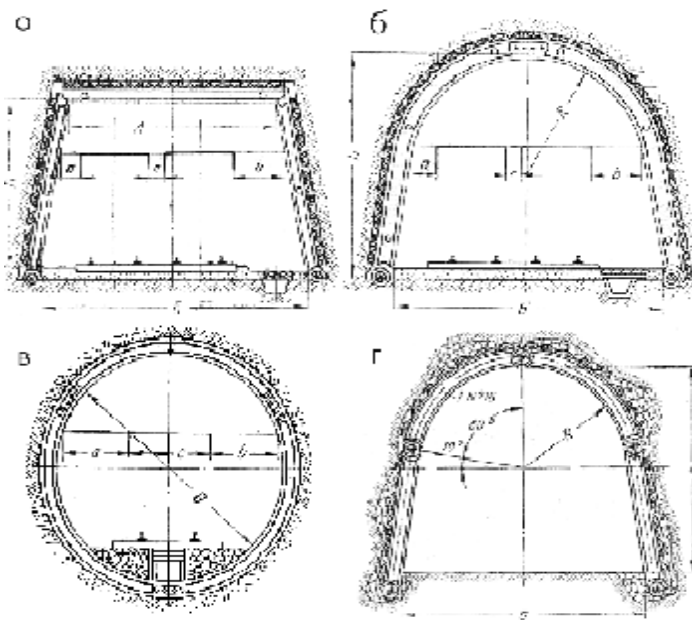


Рис. 6.1. Перші типи сталевого рамного кріплення:

а, б, в, – жорсткі конструкції; г – шарнірна

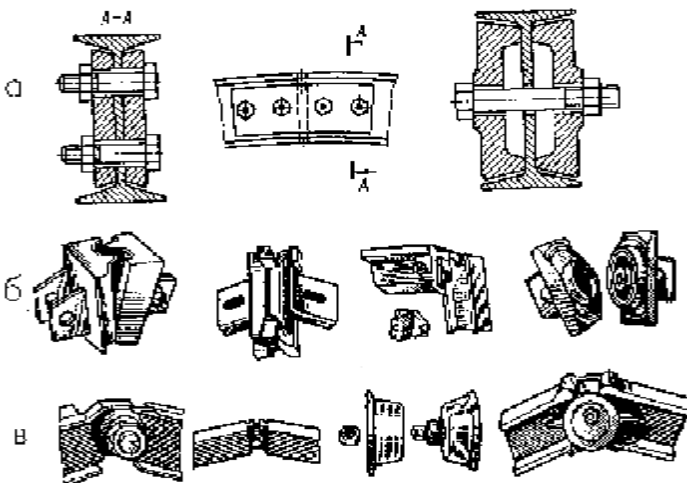


Рис. 6.2. З'єднання елементів кріплення:

а – жорстке з плоскими й фігурними планками;
б – шарнірні різніми; г – шарнірні різьбові

жень зарахунок їх передавання на оточуючі кріплення породи. Крім того, введення додаткових шарнірів дозволило помітно знизити моменти в носійних елементах, що працюють на вигин. Особлива заслуга в розробці й впровадженні шарнірних арок належить фірмі “Ф. Моль та сини”, завдяки якій у 30–40 рр. XX ст. сталеве рамне кріплення знову широко розповсюджується на шахтах Німеччини.

У 1932 р. фірма “Тіссен-Хайнцман” (Німеччина) створює парні жолобчасті профілі різних типорозмірів (рис. 6.3) та велими просту конструкцію їх з’єднання (П-образна скоба й планка). Винахід походить від конструкції податливих стояків для очисних виробок. Завдяки введенню вузлів податливості кріпильну раму (див. рис. 6.3, а), вона отримала можливість чинити опір гірському тиску без руйнування, оскільки при досягненні критичних навантажень несучі елементи конструкції зміщувались один відносно іншого і форма кріплення пристосовувалась до конвергенції порід. Ця технічна ідея виявилася настільки плідною, що вже наприкінці 1950-х років сталевим податливим кріпленням підтримувалися на шахтах західноєвропейських країн від 50% (Німеччина) до 90% (Бельгія) гірничих виробок.

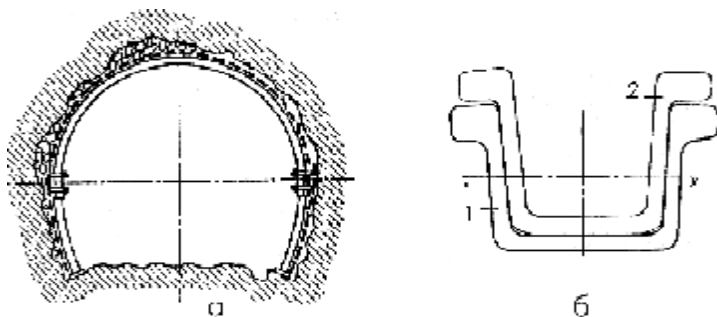


Рис. 6.3. Податливе кріплення фірми «Тіссен-Хайнцман»:

а – вигляд конструкції; б – парні профілі

Перші промислові випробування сталевих рамних кріплень у коаліційному СПСР проведені в 1947 р. Із самого початку роботи з його конструювання та впровадження були зосереджені в Україні (Донецький вугільний інститут), де були розроблені типи конструкцій кріплення, параметричний ряд спеціальних взаємозамінювальних профілів (виробництво – з 1962 р.), особливі сталі, вузли податливості, нормативні матеріали до виготовлення й застосування арочного податливого кріплення.

Дослідження “лінії життя” технічної системи сталевих рамних кріплень за останні 50 років (аналіз об’ємів та області застосування, кількості розроблених конструкцій, винаходів, що продовжують строк експлуатації

система ін.) дозволяють зробити висновок про її S-образний характеру часі. Тобто, система вже пройшла етап інтенсивного вдосконалення й наступний етап стабільного зростання, темпи її розвитку починають спадати, хоча об'єми використання залишаються достатньо високими (в Україні, Росії, Польщі вони складають близько 90%). У подальшому, згідно із законом “життя” технічних систем, сталеве раменне кріплення або будівити-снене принципово іншою системою (наприклад, анкерним кріпленням, яке вже домінує в деяких країнах), або виділено суттєво вищий рівень свого технічного розвитку.

6.2. Загальні конструктивні ознаки й елементи кріплення

6.2.1. Носійні елементи та їх профілі

Сталеве раменне кріплення – це будівельна конструкція, що складається з окремих раміз прокатних профілів, які встановлені у гірничій виробітку заданій відстані одна від одної, поєднані між собою стержнями та взаємодіють з гірським масивом через міжрамну огорожу та шар забутків. Рама складається з носійних елементів (прямо- або криволінійних стержнів), які працюють на тискання та (або) вигин. Носійні елементи, що утворюють верхню, стояки, лежень (зворотне склепіння) виконують функцію сприйняття гірського тиску й перерозподілу його на оточуючі породи, створюють підпір на контурі та протидіють розвитку зміщень порід у середині виробки. Носійні елементи поєднують між собою за допомогою особливих вузлів, причому в залежності від їх типу й розташування на рамі визначається кінематична схема й режим роботи кріплення, а також особливості його монтажу.

Для виготовлення прокату здебільшого використовують сталь типу Ст.5. Рівень її пластичних властивостей достатній для холодногovinу профілю згідно з шаблонами кріпильних елементів та поновлення ланок кріплення наштампах для повторного використання. Для підвищення міцності кріплення використовують термічну обробку профілів, а також легуванням надієм та азотом сталі (20Г2АФстін.).

Як відомо, найбільш економічним профілем при роботі носійного елементу на згинання є двотавр, який широко застосовувався в жорстких конструкціях кріплення. На жаль, забезпечити ефективне податливе з'єднання двотаврових профілів виявилось неможливим, що привело до розробки альтернативних жолобчастих профілів. У них найбільш вдало реалізовано принцип взаємного проковзування з тертям суміжних елементів, що забезпечувало заданий опір податливості. Оскільки в інших галузях (будівництво, залізничний транспорт) такі профілі не застосовували, то вони отримали назву спеціальних або шахтних.

Перші жолобчасті профілі (див. рис. 6.3, б) були парними (менший входив у більший) та забезпечували необхідний опір податливості шляхом затискання профілю 2, як клина в жолобі профілю 1. Використовували два типи розмірів профілю – 18 та 28 кг/м, відповідно для задовільних та важких умов підтримання виробок.

У подальшому були розроблені взаємозамінювальні (однакові для суміжних елементів) лоткові профілі (рис. 6.4), які не мали значного клинового ефекту при затисканні, але забезпечували опір податливості в умовах повного контактування, з концентрацією сил тертя на сполучених фланцях. Замість нію лоткові профілі не поступалися парним типом за масою, а виробництво, монтаж та відновлення кріплення з взаємозамінювальних профілів мало значно кращі технічні та економічні показники. Типовий ряд лоткових профілів типу V (фау) має 10 варіантів від 13 до 44 кг/м.

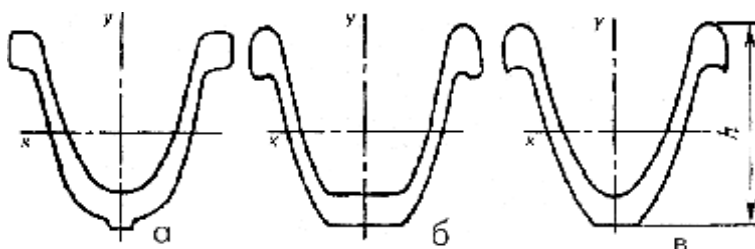


Рис. 6.4. Німецькі конструкції профілів типу V:

а – дзвоноподібний; б – лотковий; в – лотковий уніфікований

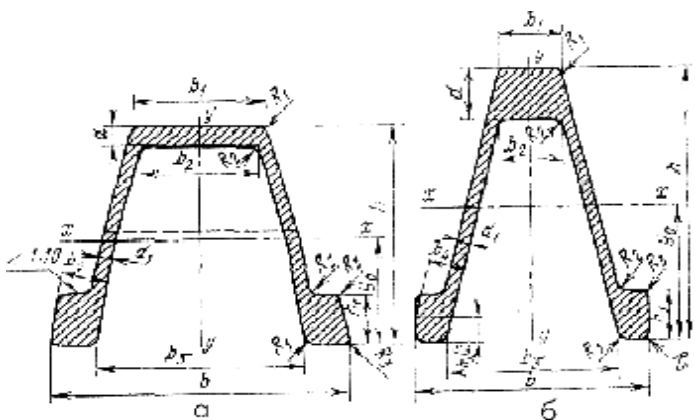


Рис. 6.5. Спеціальні взаємозамінювальні профілі (СВП):

а – типовий; б – уніфікований

Розроблений в Україні спеціальний взаємозамінювальний профіль СВП (рис. 6.5, а) за багатьма масивними геометричними характеристиками переважає відомі зарубіжні аналоги, отримав найбільше розповсюдження і залишається базовим шахтним профілем українських колишнього СРСР. Відмітною рисою профілю СВП є дві похилі площини його стінок, які забезпечують клиновий ефект податливого з'єднання: при затисканні профілів проковзування кінців верхня кавжолобістостяків приводить до необхідності часткового розкриття їх профілів, що суттєво збільшує опір податливості. Типорозмірний ряд: 14, 17, 19, 22, 27, 33 кг/м (востанні роки використовують здебільшого важкі профілі СВП 27 та СВП 33).

Виявлені в процесі багаторічної експлуатації окремі недоліки профілю СВП (недостатній опір крутильним деформаціям, виключення з податливої роботи фланців, концентрація напружень у донній частині) привели до пошуку нових конструкцій, серед яких слід відзначити тупольську розробку СВПУ (рис. 6.5, б) з підвищеною несучою здатністю при крутінні (умови на висхідних навантажень) та спеціальний профіль Алчевський-СПА (рис. 6.6, а), в якому підсилено донну частину, а геометрія профілю забезпечує як клиновий ефект, так і тертя поверхні фланців (рис. 6.6, б). Порівняльні геометричні характеристики перерізів профілів СВП, лоткового V(фау) та СПА наведені в таблиці 6.1.

Слід зазначити, що опір жолобчастих профілів згинанню значною мірою залежить від сторони прикладання навантаження. Несуча здатність профілю вразі навантаження донної частини виявляється на 20–30% більшою, ніж при навантаженні фланців. Це пояснюється тим, що прикладання сил на фланці приводить до більшого розкриття профілю, зменшення його висоти та моменту опору. Тому більш раціональним є роз-

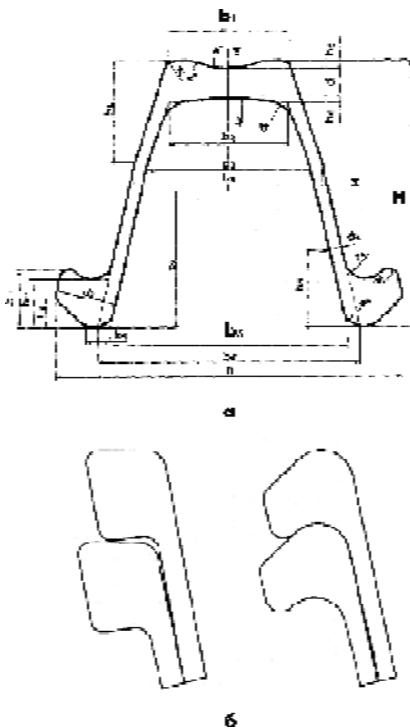


Рис. 6.6. Спеціальний профіль «Алчевський» (СПА):

а – конструкція; б – взаємодія фланців профілів СВП та СПА

ташування профілю до ночною частини юв бік порід (привідсутності значних навіскісних навантажень). Проте в цьому випадку не забезпечується надійне утримання з'яток на рамах кріплення, із звичайних профілів орієнтують фланцями до породи.

Таблиця 6.1 – Порівняльні параметри профілів

Тип профілю	B мм	b ₅ мм	b ₁ мм	d мм	d ₁ мм	h ₂ мм	H мм	I _x см ⁴	W _x см ³	I _y см ⁴	W _y см ³	F см ²	G кг/м
СВП 27	150	100	60	13	7	29	123	646	100	732	99	34,4	27
СВП 33	166	110	66	15	8	32	137	1000	139	1228	148	43	33
V 25	135	104	46	15	8	29	118	484	80	560	83	32	25
V 32	171	128	60	16	8	36	137	836	121	1172	137	41	32
СПА 27	166	113	58	14	6	28	128	700	107	806	98	34	27
СПА 33	182	125	65	15	7	31	143	1061	145	1193	131	42	33

6.2.2. Вузли податливості

Працездатність та деформаційно-силові характеристики кристалового рамного кріплення значною мірою визначаються конструкцією з'єднань його носійних елементів. Широке розповсюдження податливого кріплення зумовлено його властивістю пристосовуватися до значних зміщень порід шляхом збільшення напуску профілів у вузлах податливості. Функціями вузлів є силове обтискання профілів наділками напуску й забезпечення їх проковзування, коли навантаження на раму досягне граничної величини (як правило, опір вузла складає 100–130 кН).

За принципом роботи виділяють силові (різьбові) та деформаційні (клинові, кулачкові) вузли податливості (рис. 6.7, 6.8). Найбільше розповсюдження в країнах колишнього СРСР отримав типовий вузол, що складається з П-образної скоби, плоскої планки та гайок (рис. 6.7, а). Його переваги – простота виготовлення й монтажу, незначні вимоги до кваліфікації робітників. Проте багаторічний досвід експлуатації вузла виявив низку конструктивних недоліків, які ставлять під сумнів його надійність та працездатність. При монтажі вузла на натягні (занормують кинесні) необхідно загнути вузол

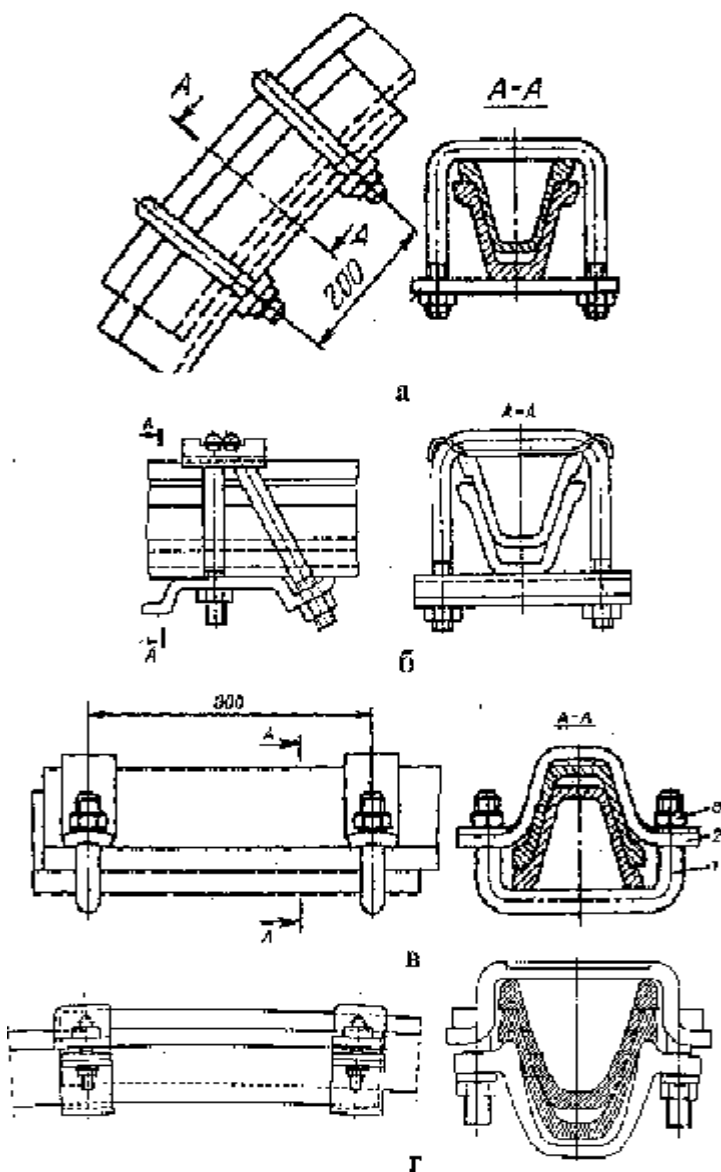


Рис. 6.7. Конструкції різьбових вузлів підатливості:

а – типовий; б – ЗСД; в – ЗПК; г – «Тіссен»

початку згинання планки) скоби круглого перерізу взаємодіють з фланця- митаким чином, що зусилля сягають граничних величин контактної міц- ності сталі, зумовлюючи т. зв. “ефект зварювання”. Під дією поздовжньої сили (від зовнішнього навантаження рами) профілі починають просувати- ся один відносно другого, причому верхня кляг не засобою скобу, а планка вузла зміщується в протилежний бік (іноді залишається в початковому по- ложенні). Це призводить до розтягання (перекосу) скоб і може викликати навіть їх розрив. Коли кут нахилу скоб досягне граничної величини й подо- лає місцеве зчеплення із фланцями, станеться динамічне проскакування профілів тарозвантаження скоб. Після цього характеристики вузла вжене відповідают заданим вимогам, оскільки розтягнуті скоби не забезпечу- ють необхідного обтискання профілів. В абочному кріпленні це призво- дить до обпирання верхня канакінець стояка, заклинювання його днищі (часом із розривом останнього) й передчасному переходу до жорсткого режиму роботи. У трапецієвидних конструкціях спостерігається повне ви- черпання податливості зосіданням покрівлі.

Для усунення цих недоліків були розроблені удосконалені конструкції податливих з’єднань. У вузлі ЗСД (рис. 6.7, б) широка фігурна планка по- в’язує скоби з боку днища профілю, причому одна із скоб розташована під кутом. З боку фланців скоби поєднані тонкою фігурною планкою, яка за- безпечує необхідні контактні умови (запобігає контакту з “ефектом зварю- вання”). Таким чином, скоби жорстко поєднані одна з одною й працюють разом, що покращує податливу характеристику кріплення й виключає не- контрольований перекискоб.

На основі німецького досвіду створена конструкція вузла ЗПК (рис. 6.7, в), яка складається із фігурної планки, що охоплює контур профілю з боку його днища та скороченої скоби для стискання флан- ців. Перевагою конструкції є зменшення моментів згинання скоб, оскі- льки вона значно коротші ніж у типовому вузлі, а, завдяки фігурним план- кам, опір податливості збільшено майже в 1,5 рази.

Позитивні тенденції вузла ЗПК ще більш підсилені у вузлі фірми “Тіс- сен” (рис. 6.7, г), який став основним у більшості розвинених гірничодобу- вних країн. Охоплення профілю з обох боків широкими фігурними планка- ми забезпечує підвищений опір податливості та стабільну характеристику роботи вузла. Наявність спеціальних упорів фіксує положення вузла відно- сно торців несучих елементів. Проте підвищена вартість конструкції та скла- дність її монтажу поки що стримують широке застосування аналогів вузла фірми “Тіссен” навіть у цих шахтах.

Серед конструкцій з деформаційним принципом роботи слід відзна- чити кулачковий вузол (рис. 6.8, а), який складається із двох притискових кулачків 3, які знизу обжимають фланці, фігурної планки 5, що охоплює

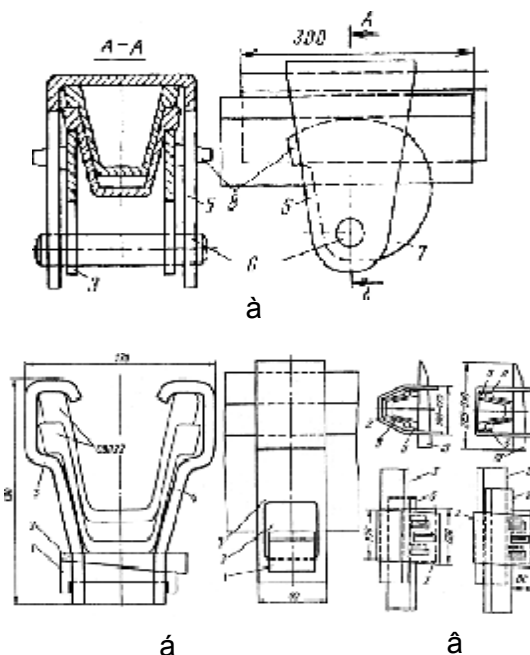


Рис. 6.8. Конструкції деформаційних вузлів піддатливості:

а — кулачковий; б, в — клинові

профілі; осі 6 та обмежувачів повертання 8. Оскільки робоча поверхня кулачків виконана різними радіусами, то вузол забезпечує режим податливої роботи з наростаючим опором (до повного блокування вузла при податливості 25 – 30 см). Трудомісткість монтажу значно нижча, ніж у різьбових з'єднаннях, але вага й вартість приблизно 1,5 рази перебільшують інші вузли. Конструкції клинових вузлів (рис. 6.8, б) не отримали широкого промислового впровадження, але мають перспективи подальшого вдосконалення, оскільки значно спрощують монтаж рамного кріплення.

6.2.3. Міжрамні огорожі

Важливою та невід'ємною частиною сталевого рамного кріплення міжрамні огорожі (затяжки), які запобігають вивалам порід у виробку, виконують функції сприйняття гірського тиску з боку масиву порід, передачу його на мікріплення, а також (в окремих випадках) функцію об'єднання рам у просторову систему.

За ступенем жорсткості, який визначає режим роботи міжрамної огорожі, розрізняють еластичні конструкції (рулонна скотканина, металева сітка), частково податливі (дерев'яні, полімерні, металеві ґратчасті) та тонко еластичні.

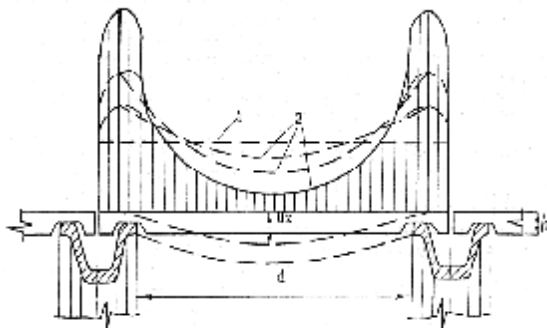


Рис. 6.9. Перерозподіл навантаження на затяжку й рами кріплення:

- 1 – епюра навантаження в початковій стадії;
2 – сімейство епюр у процесі вигину затяжки

тові конструкції) та жорсткі (залізобетонні) затяжки. Ступінь жорсткості характеризує можливість затяжки перерозподіляти навантаження з прогонної частини на рами кріплення під час прогину під дією гірського тиску (рис. 6.9). При цьому сама затяжка розвантажується й уникає руйнації. Робота в жорсткому режимі не передбачає про-

гину, тому носійна здатність таких міжрамних опор повинна дорівнювати несучій спроможності рам кріплення, що потребує підвищеної матеріаломісткості затяжок.

Історично склалося, що найбільше розповсюдження, завдяки простоті виготовлення, невеликій вазі та зручності монтажу, отримали дерев'яні затяжки у вигляді дощок та розпилів товщиною 30–50 мм (у складних умовах застосовували кругляк діаметром 70–120 мм). У колишньому СРСР дерев'яною затяжкою кріпилося до 80% підготовчих виробок шахт, що значною мірою було зумовлено фактором ціни деревини, часом без урахування витрат на численні ремонтні перекріплення виробок, травматизм робітників від вивалів порід.

Недостатня носійна здатність (затяжка рунується при навантаженні 10–20 кПа) та малий строк служби внаслідок гниття (0,5–3 роки) стали причинами масових відмов дерев'яних затяжок (рис. 6.10). Суттєвим недоліком конструкції є також горючість деревини, що скорочує область її можливого застосування. У більшості розвинених гірничодобувних країн дерев'яну затяжку виключено з конструктивних елементів сучасного кріплення.

У виробках із значним строком служби (10 років і більше) широкое розповсюдження отримали залізобетонні затяжки (рис. 6.11). Здебільшого їх виконують у вигляді плоских плит розміром 1000х200х50 мм і вагою 24 кг, армованих сіткою із сталевих дротів (діаметр робочих стержнів 8 мм). Носійна здатність таких затяжок в умовах рівномірного навантаження сягає 50 кПа. Недоліками конструкції є розташування арматури поблизу нейтрального шару, що майже не підвищує опір бетону згинним зусиллям; недостатня надій-



Рис. 6.10. Вигляд зруйнованих дерев'яних з'язжок при задовільному стані рам кріплення

ність утримання кінців з'язжок на фланцях спецпрофілю; ламкий характер деформування з'язжки з можливим обваленням у виробку. Крім того, низька ударна міцність є причиною руйнування до 20% з'язжок ще при транспортуванні до вибою, трудомісткість монтажу сягає близько 40% усіх трудовитрат на кріплення, а витрати залізобетону на 1 погонний метр виробки складають 0,4 – 0,5 м³. Суттєве збільшення носійної здатності залізобетонних з'язжок досягнуто в кесонних, таврових та фасонних конструкціях (див. рис. 6.11, б–д), але з причин підвищеної ціни, складності їх виробництва, транспортування й монтажу вони не отримали широкого розповсюдження.

Зарубежні метою економії матеріалів і підвищення надійності утримання конструкцій на рамах кріплення застосовують залізобетонні з'язжки, які мають переріз 110х60 мм і довжину, що перебільшує міжрамну відстань на 300 мм (рис. 6.12). Такі з'язжки розміщують в розгін (ажурно), але відстань між з'язжками не дозволяє просипатися крупним уламкам порід. Завдяки консолям (подовженим кінцям з'язжок, що перебивають профілі) забезпечується надійне затискання кінців з'язжок на рамах, тому навіть при зламі бетону в прогінній частині з'язжка зберігає свою працездатність, оскільки арматура в цьому випадку працює як вантова конструкція. Розташування з'язжок “плиском” (див. рис. 6.12, а) і “на ребро” (див. рис. 6.12, б) дає можливість регулювати опір міжрамної огорожі відповідно до розподілу гірського тиску по периметру кріплення.

Переваги піддатливого режиму роботи з'язжок зумовили застосу-

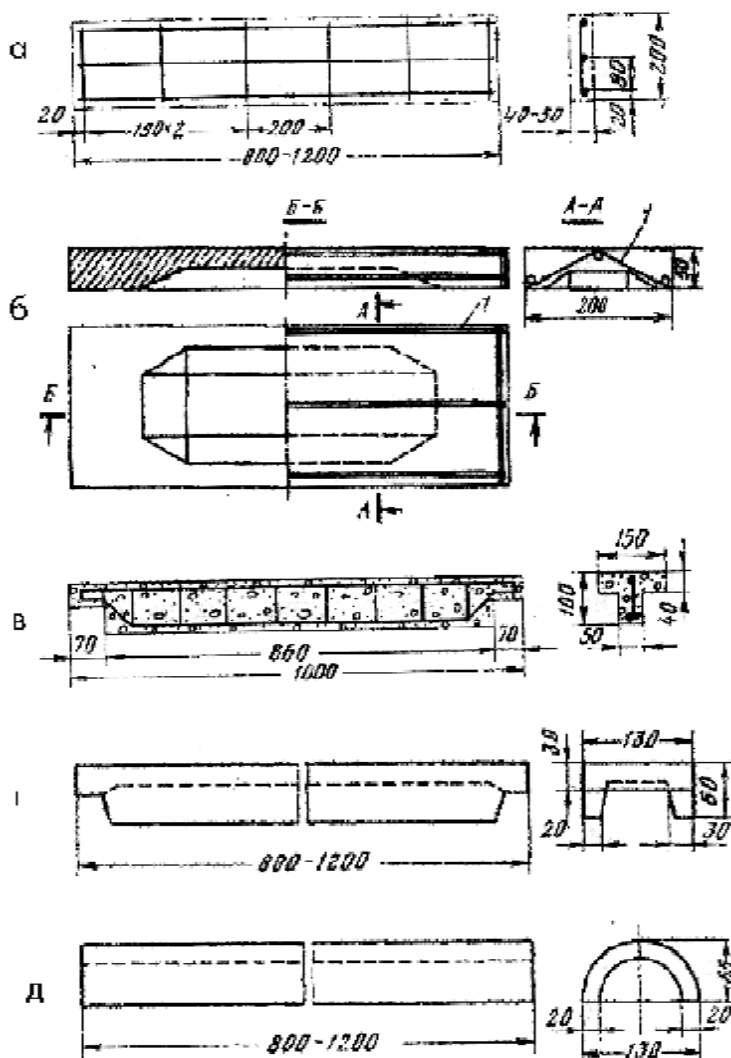


Рис. 6.11. Конструкції залізобетонних затяжок:

а – плоска; б – кесонна; в – таврова; г, д – фасонні

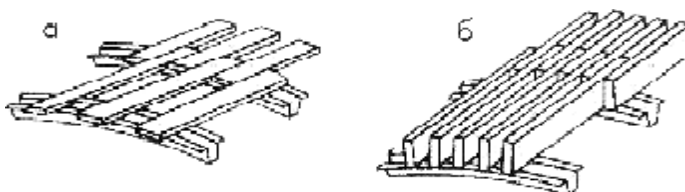


Рис. 6.12. Залізобетонні зтяжки, що встановлені врозгін:

а – плоском; б – на ребро

вання гнучких конструкцій із склопластику, металевих ґрат, тонколистової сталі. Зазвичай склопластикові зтяжки виконують у вигляді листів хвилясто-гопрофільної з плоскими кінцями (рис. 6.13), які поєднують між собою спеціальними джгутами. Міцність такої зтяжки більша, ніж у плоскої бетонної конструкції, а товщина вага – у 5-6 разів менша. Склопластике безпечним у пожежному відношенні має великий строк служби. За рахунок необхідної орієнтації й групування складжугутів при їх фіксації в полімерній смолі можливе конструювання міжрамної огорожі у відповідності з розподілом навантажень накріплення. Проте, висока вартість конструкцій із склопластику та недостатня надійність і технологічність поєднань зтяжок між собою стримують застосування цього перспективного матеріалу.

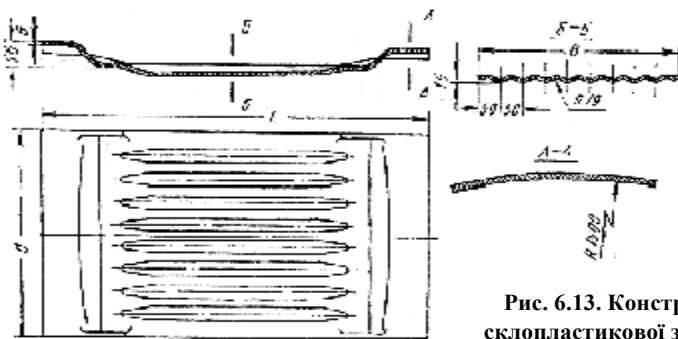


Рис. 6.13. Конструкція склопластикової зтяжки

Одним з базових типів зтяжок є сталеві ґратчасті конструкції (рис. 6.14). Найбільш прості у виготовленні й монтажі – решітки із прутків діаметром 8 – 10 мм із загнутими кінцями поздовжніх стержнів, які заводять за фланці профілю. Типовий розмір вічок 100х100 мм. Слід зазначити, що в даному випадку носійна спроможність міжрамної огорожі значно поступається зтяжкам, що поєднані між собою (див. рис. 6.14, б, в), оскільки зусилля розгинання зачепів у 3-5 разів вищі, ніж зусилля розривання стержнів. Тому більш ефективними є конструкції з петльовими з'єднаннями, в яких розмі-

щують монтажні стержні, або з вузлами, що надійно затягуються один в однім по мірі прогину суміжних затяжок. При цьому складність монтажу й підвищена вартість затяжок компенсуються ефективністю й надійністю роботи міжрамної огорожі.

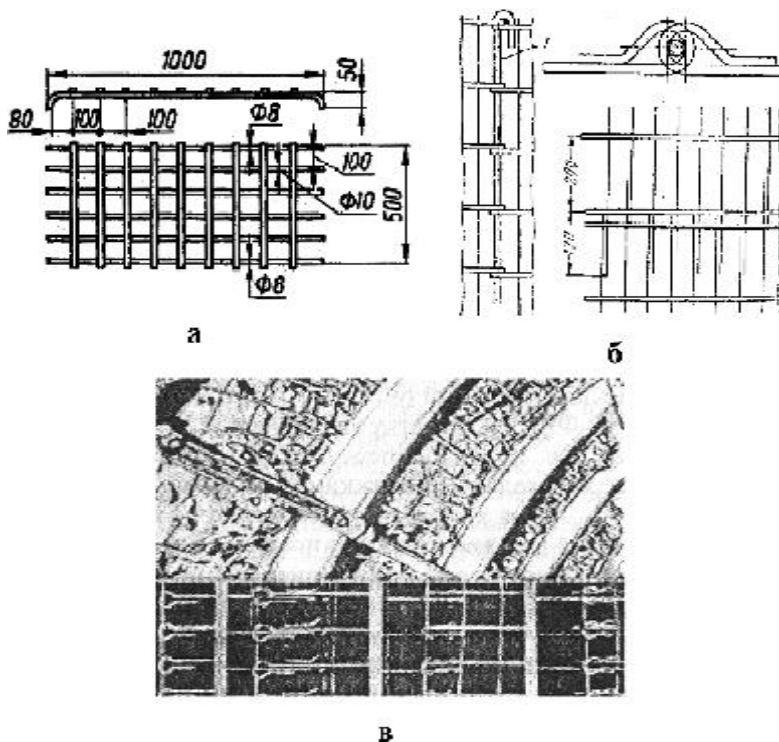


Рис. 6.14. Сталеві ґратчасті затяжки:

а – з простими зачепами; б – із стержньовим з’єднанням петель;
в – з петльовою взаємодією (фірми «Зальцгіттер»)

Серед сталевих тонколистових затяжок виділяють перфоровані та суцільні конструкції. Для забезпечення стійкості виробок у тяжких гірничо-геологічних умовах застосовують затяжки у формі тонкостінного жолоба із зачепами на кінцях (рис. 6.15). Типові розміри складають 1000х300х60 мм, товщина листа – 2 мм. Конструкція тарозташування зачепів надійно утримує затяжку на рамах кріплення, забезпечують ефективну роботу під час прогину й перерозподілу навантаження рамами. Крім того, ці затяжки при навантаженні ефективно розпирають рами у повздовжньому напрямку, запобігають їх відхиленню від проектного положення, забезпечують

просторову роботу кріплення (тобто вирівнюють зусилля у суміжних рамах). Невелика вага (4–6 кг), простота виготовлення й монтажу доповнюють переваги цих конструкцій. Недоліком є обмежений строк служби в умовах вологого середовища, що зумовлено інтенсивною корозією сталевих листів. Антикорозійне покриття суттєво збільшує довговічність, але й вартість таких з'єднань (вона в 1,5–2 рази більша від залізобетонних).

Перспективним напрямком вдосконалення паспортів кріплення гірничих виробок є застосування комбінованих міжрамних огорож, у яких з боку покрівлі розташовують з'єднання підвищеної несучої здатності (або двох шарів звичайних конструкцій), а на іншій частині периметра – дешеві, легкі конструкції огорож. Це забезпечує підвищену надійність та безпеку гірничих виробок без збільшення вартості кріплення.

6.2.4. Стяжки, клини, забутівка

Однією з причин незадовільної роботи рамок кріплення є нерівномірність розподілу гірського тиску вздовж виробки по периметру, що зумовлено порушеннями й неоднорідністю порід, кутами їх залягання, пустотами закріпного простору, відмінностями механічних характеристик окремих порід, контактними умовами їх взаємодії з масивом тощо.

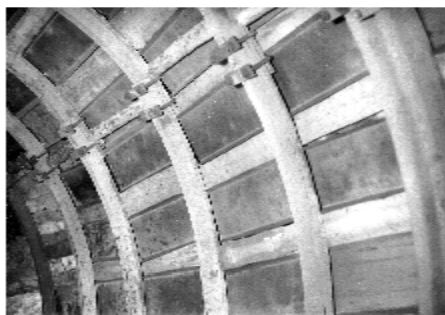
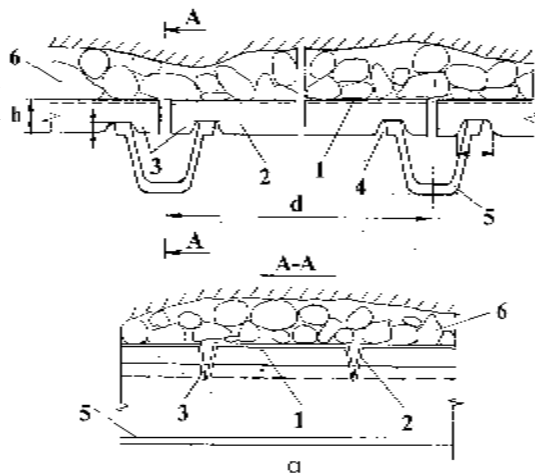


Рис. 6.15. Сталева тонколистова стяжка жолобчастої форми:

а – конструкція (1 – днище, 2 – стінки, 3 – зачепи, 4 – вирізи, 5 – рама, 6 – забутівка); б – застосування у штреку

Теоретичні й лабораторні дослідження роботи рамного кріплення свідчать про суттєву різницю між роботою плоскої арки й просторової системи рам, поєднаних поздовжніми в'язями. Для забезпечення спільної роботи рам кріплення, зниження крутильних деформацій профілю, вирівнювання навантаження між суміжними рамами, утримання їх у проектно-муположенні (при скісних навантаженнях, вибухових роботах) застосовують міжрамні стяжки (рис. 6.16).

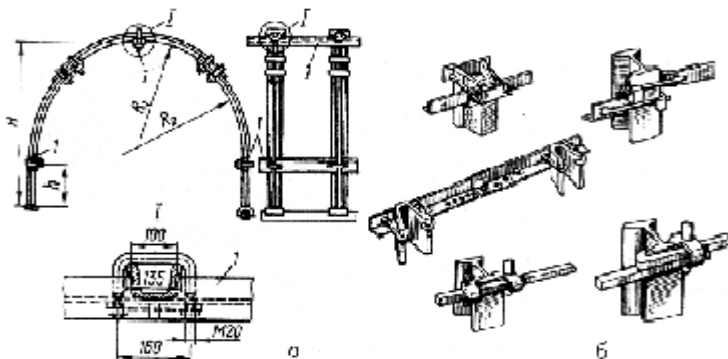


Рис. 6.16. Конструкції міжрамних стяжок:

а – типові (1); б – фірм Німеччини

У типових конструкціях кріплення застосовують зазвичай три стяжки, одну з яких розміщують у вершині склепіння, дві інші – на прямолінійних ділянках стояків. Таке розташування зумовлене монтажними умовами утримання стояків при зведенні рами. Більш ефективним для просторової роботи рами є розміщення кількох стяжок на верхняку (при умові заглиблення кінців стояків у лунках підпошви). У зарубіжній практиці, особливо при використанні у виробках монорельсового транспорту, кількість стяжок сягає 7-9, що значно підвищує стійкість кріплення, але одночасно збільшує вартість та трудомісткість його монтажу. Перспективним напрямком забезпечення просторової роботи кріплення слід вважати поєднання функцій затяжок і стяжок у конструкціях міжрамного горижа (як приклад – див. рис. 6.15).

Носійна здатність кріплення при вертикальному гірському тиску на раму значною мірою залежить від розподілу на її контурі реактивного (пасивного) навантаження, яке виникає від опору бокових порід зміщенням стояків у бік масиву. У перший період роботи кріплення реактивне навантаження передають за допомогою дерев'яних клинів, які вбивають між породним оголенням і ділянкою рами, що обмежена скобами (фігурними планками) податливого вузла (рис. 6.17). У разі похилого залягання порід

переважні навантаження формуються по нормалі до їх на шарування, тому для більш рівномірного розподілу зусиль застосовують несиметричне розташування клинів (рис. 6.18).

Іноді клини використовують для раціонального розподілу активного навантаження на верхняк кріплення. Завдяки клинам, можливо віднести місця зовнішнього навантаження від середини верхняка ближче до його опор (рис. 6.19), що скорочує максимальні вигинні моменти в 1,5 – 1,8 рази.

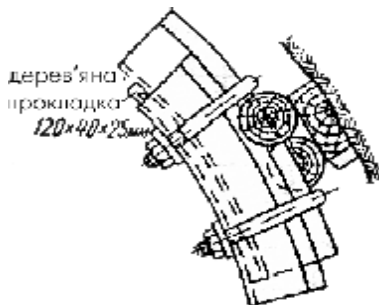


Рис. 6.17. Типове розклинювання арки

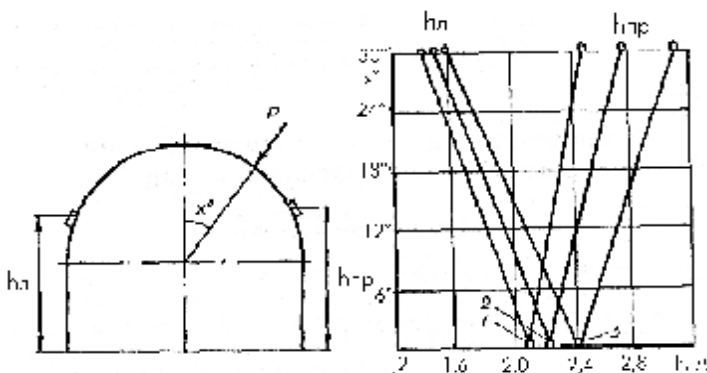


Рис. 6.18. Доцільне розташування клинів у разі несиметричного навантаження арки:

α – кут прикладення навантаження; h_l , h_r – висота від підосви виробки до місця вбивання клину зліва та справа від осі симетрії виробки (1 – для СВП-22, 2 – СВП-27, 3 – СВП-33)

Особливе значення для забезпечення працездатності рамного кріплення має якісне заповнення закріпного простору, яке забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження, прискорює відкріплення у взаємодію з породним масивом (чим зменшує зону руйнування порід), зберігає затяжку від впливу вибухової хвилі під час буропідливних робіт, поліпшує вентиляцію виробок.

Технічні вимоги до зведення кріплення передбачають його забутівку, тобто заповнення порожнин уламками порід по всьому периметру

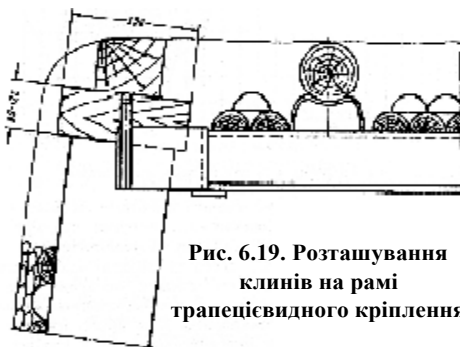


Рис. 6.19. Розташування клинів на рамі трапецієвидного кріплення

рами. Середньостатистичні проміжки між контуром виробки та кріпленням складають 20-30 см (при нормі—10см). Велика трудомісткість забутичних робіт зумовлює недостатню щільність викладки й розташування її лише в боках виробки (урівень зросту робітника). При цьому в покрівлі можуть формуватися зо-

реджені навантаження, що призводять до виникнення вигинних моментів у склепінні арочного кріплення, які в 2-2,5 рази перебільшують нормативні. Крім того, відсутність опору кріплення на початковому етапі зміщень порід покрівлі зумовлює збільшені розміри зони руйнування масиву. У зв'язку з цим перспективним є використання високотехнологічних способів приготування й транспортування забутивки: пневматичні засоби закладки кускового матеріалу, тампонаж твердіючих сумішей тощо.

6.3. Основні типи сталевих рам

Найбільше розповсюдження в практиці кріплення гірничих виробок шахтотрималирами арочної форми, яка близька до склепіння природної рівноваги гірського масиву. Базовою конструкцією є арочне податливе кріплення КМП-А3 (кріплення металеве податливе арочне трьохсегментне) з циркульним склепінням (рис. 6.20). Його застосовують у приміщенні

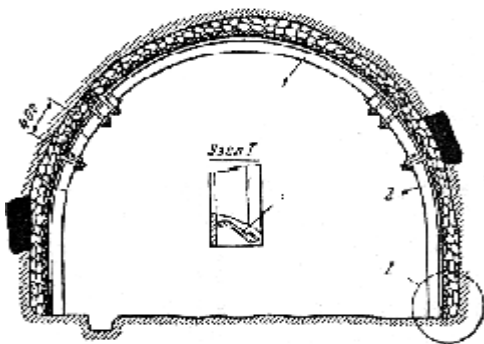


Рис. 6.20. Арочне податливе кріплення КМП-А3:

1 – верхняк; 2 – стояки; 3 – діафрагма

оточуючих порід понад 30 МПа й очікуваних вертикальних зміщеннях до 300-400 мм. Розроблено сім типорозмірів кріплення КМП-А3, які забезпечують площу перерізу виробок від 7 до 18,3 м². Носійна здатність кріплення в залежності від розмірів, типу спецпрофілю й вузлів податли-

вості складає від 120 до 200 кН (у податливому

режимі) й до 300 кН у жорсткому. Завдяки універсальності, простоті виготовлення й монтажу об'єми застосування цієї конструкції навіть у чистих шахтах сягають близько 80%.

Серед типів арочного кріплення використовують конструкцію підковообразної форми із зміщенням кінців стояків у бік виробки (рис. 6.21). Завдяки цій формі, несучі елементи кріплення сприймають підвищені вигинні моменти при боковому тиску. Важливою перевагою є збільшення габаритних зазорів виробки на висоті транспортних засобів, що підвищує надійність її експлуатації. Одночасно слід відзначити складність установлення затяжок, збільшені витрати на виготовлення кріплення, необхідність щільної забутівки (для підвищення ефекту пасивного опору порід при вертикальних навантаженнях).

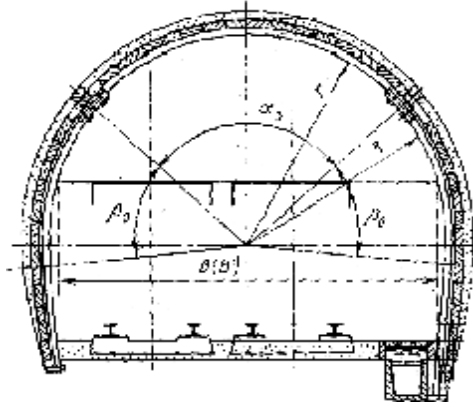


Рис. 6.21. Арочне кріплення підковообразної форми

Для умов всебічного гірського тиску й очікуваного здимання підосви виробки застосовують дугову форму кріплення (рис. 6.22), яка відрізняється від підковообразної протилежним нахилом стояків. Зменшений розмір верхняка полегшує його монтаж, спрощене також встановлення затяжок. Конструкція зменшує роль пасивного опору бокових порід. При деформуванні стояків різко вичерпуються транспортні зазори. Конструкція лише незначно може впливати на зміщення порід підосви.

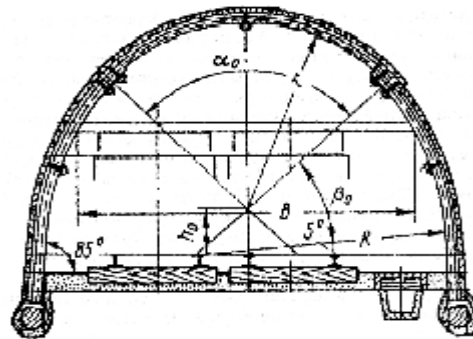


Рис. 6.22. Арочне кріплення дугової форми

У багатьох випадках напрямки переважних зміщень порід відхиляються від вертикалі. В умовах несиметричного навантаження розглянуті конструкції (див. рис. 6.20–6.22) не забезпечують заданої податливості, що веде до передчасного переходу в жорсткий режим роботи й деформаціям

елементів кріплення. Тому для умов похилого залягання порід застосовують чотириох сегментні арочні конструкції з трьома податливими з'єднаннями (рис. 6.23), які забезпечують податливість кріплення як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. Недоліками цих конструкцій є підвищена вартість кріплення й складність монтажу, а також послаблення несучої здатності складеного верхняка за рахунок розташованого в покрівлі виробки вузла податливості.

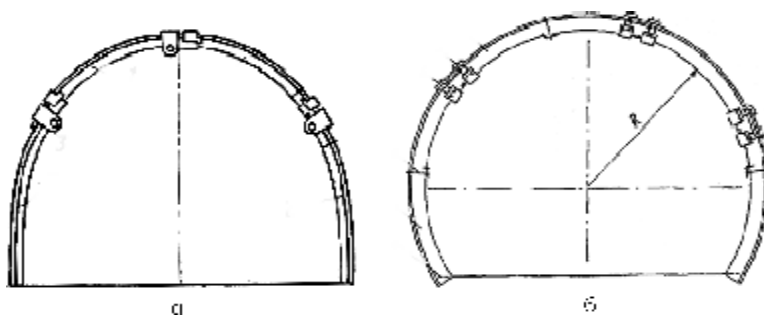


Рис. 6.23. Чотириох сегментні арочні конструкції для похилого (а) та крутого (б) залягання порід

Для протидії здиманню підосви виробки застосовують кільцеву форму кріплення, а також конструкції із зворотним склепінням (рис. 6.24). Замкнуті конструкції відрізняються складністю, трудомісткістю монтажу, потребують збільшення площі виробки (об'ємів прохідницьких робіт), але не завжди забезпечують стійкість підосви. Більш раціональними є комбіновані конструкції, що поєднують рамне кріплення з анкерами у підосві, або формують зворотне склепіння із розвантажених камуфлетними вибухами й зміцнених цементними розчинами порід (див. розділ 8).

В умовах горизонтального або пологого залягання порід, коли покрівля складена достатньо стійкими шаруватими породами, їх підривання для створення арочної форми виробки порушує несучу здатність породних пластів і є недоцільним. У цьому випадку слід застосовувати трапецієвидну або прямокутну конструкцію рамного кріплення з розташуванням прямолінійного верхняка під плоскою покрівлею, утвореною непорушеним шаром порід. При цьому забезпечують економію металопрокату за рахунок зменшення периметра рами та досягають найбільш повного функціонального використання площі перерізу виробки, яка може бути скорочена у порівнянні з арочною формою на 10-15%.

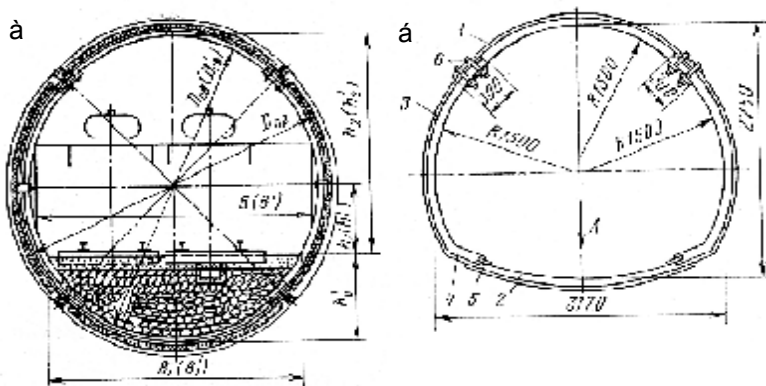


Рис. 6.24. Кріплення для умов здимання підшови:

а – кільцеве; б – із зворотним склепінням

Найбільш простою трапецієвидною конструкцією є кріплення МТПШ (аналог – КПС), у якому для з'єднання прямолінійних елементів стояків використовують типові П-образні вузли (рис. 6.25). Оскільки після розтягання скоб вузлів під час податливості можливе просідання рами, вузли розташовують на відстані 40 – 50 см від підшови, що запобігає втраті необхідної висоти виробки. Більш ефективним є кріплення МПК-Т1 (рис. 6.26), у якому застосовують кулачкові вузли, що забезпечують вертикальну податливість до 60 см з наростаючим опором кріплення. Перспективним є застосування вузлів ЗПК та фірми “Тіссен” (див. рис. 6.7, в, г).

“Слабкою ланкою” типових конструкцій є недостатня несійна здатність прямолінійного верхняка, який працює на вигин, тоді як стояки – здебільшого на стискання, що забезпечує їм значний запас міцності.

Користуючись формулою (2.1), легко довести, що навіть при рівномірному розподіленому навантаженні при довжині верхняка більше 3,5 м його деформація почнеться ще до початку спрацювання вузлів податливості (зусилля проковзування у вузлах близько 100 кН). Спроби підсилити верхняк проміжними стояками чи розкосами скорочують корисну площу перерізу виробки, обмежують транспортні можливості, збільшують

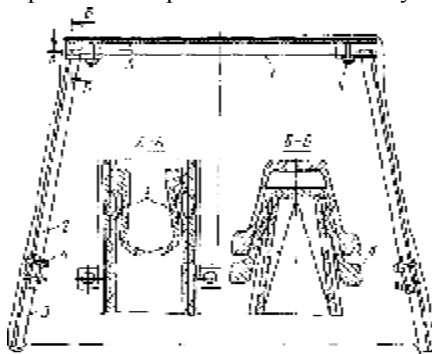


Рис. 6.25. Трапецієвидне кріплення МТПШ (КПС)

його деформація почнеться ще до початку спрацювання вузлів податливості (зусилля проковзування у вузлах близько 100 кН). Спроби підсилити верхняк проміжними стояками чи розкосами скорочують корисну площу перерізу виробки, обмежують транспортні можливості, збільшують

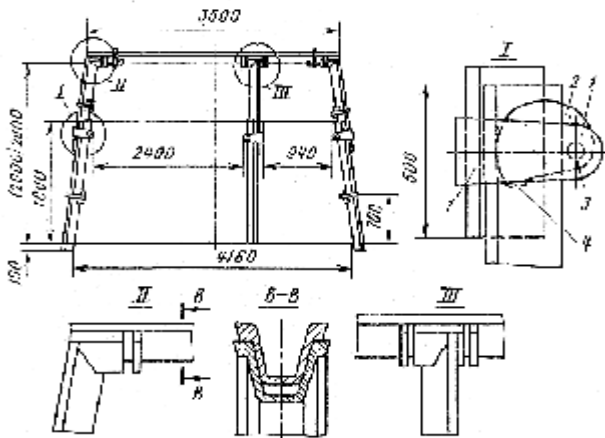


Рис. 6.26. Конструкція кріплення МПК-Т1

матеріаломісткості вартість кріплення. Саме цим можна пояснити недостатню розповсюдженість економічно доцільної й перспективної трапецієвидної (прямокутної) форми виробок.

6.4. Основні напрямки конструктивного вдосконалення сталевого рамного кріплення

Враховуючи сучасні масштаби застосування сталевих кріплень у вугільних шахтах (до 90%), суттєвий вплив на собівартість вугілля (складові кріплення та підтримання виробок сягає до 15%), перехід гірничих робіт на значні глибини (700-1000 м), слід розглянути шляхи підвищення ефективності надійності рамних конструкцій, зменшення їх вартості й матеріаломісткості.

Екстенсивний підхід, який передбачає, у відповідності із зростанням глибини розробки та площі перерізу виробок, використання більш важких профілів та перехід на збільшену щільність встановлення рам не вирішує проблему надійної експлуатації виробок, не відповідає принципам економічної доцільності. Основні напрямки вдосконалення роботи кріплення полягають у забезпеченні його ефективного взаємодії з масивом порід, у розвитку адаптивних властивостей конструкції та управління її напруженням станом.

Ефективна контактна взаємодія передбачає якомога скоріше введення кріплення у контакт з масивом, гальмування розвитку зони руйнування порід навколо виробки, формування рівномірно розподіленого по периметру рами зовнішнього навантаження. Як свідчить досвід, забезпечити ці умови шляхом ручної забутківки закріпного простору не вдається. Вельми перспективним є спосіб вибухової забутківки порожнин, який передбачає після зведення рамного кріплення буріння шпурів по контуру виробки та

подрібнення масиву шляхом підривання камуфлетних зарядів вибухових речовин (рис. 6.27). Одночасно із формуванням сприятливих контактних умов спосіб забезпечує розвантаження масиву від напружень, що сприяє поліпшенню геомеханічної ситуації навколо виробки.

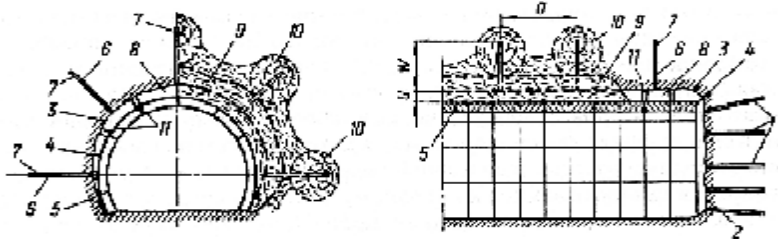


Рис. 6.27. Спосіб вибухової забутівки:

- 1 – забійні шпурси; 2 – вибій; 3 – контур виробки; 4 – контур кріплення;
- 5 – конструкція кріплення; 6 – поперечні шпурси; 7 – камуфлетні заряди;
- 8 – порожнини за контуром кріплення; 9 – зона подрібнення; 10 – радіус внутрішньої зони подрібнення

Широке застосування на шахтах європейських країн знайшов спосіб введення рам у взаємодію з масивом за допомогою рукавів «Буллфлекс» (Німеччина). Спосіб передбачає (рис. 6.28) після зведення арки вкладання всередину жолобчастого профілю еластичних рукавів, у котрі нагнітають розчин цементної суміші з прискорювачами твердіння. У результаті об'ємного розширення рукавів (за технічними умовами – до 250 мм) між рамою огорожа притискається до породного контуру, а рама по всій довжині

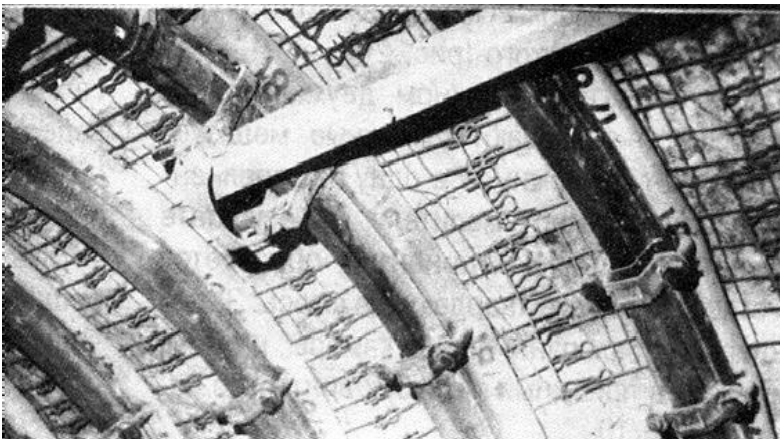


Рис. 6.28. Рукави «Буллфлекс» у гірничій виробці

входить у контакт з масивом. Завдяки мікроотворам в технічній тканині рукавів вода має змогу витіснитися із твердіючої суміші (під тиском 600 кПа), що дозволяє відразу після заповнення рукавів створювати рівномірний розпірarki.

Вельми перспективним для підвищення стійкості трапецієвидного (прямокутного) кріплення є спосіб розпору рам шляхом силового розсування елементів стояків (рис. 6.29). Зусилля розпору (зазвичай по 50 кН) створюють за допомогою розпірних пристроїв, які розташовують на обох стояках. Після фіксації зусиль шляхом затягнення вузлів податливості розпірні пристрої демонтують. Спосіб значно зменшує процеси розшарування порід покрівлі та їх зміщення в бік виробки. Крім того, ефект розклинювання рами між породами покрівлі та підлоги забезпечує надійне утримання її в проектному положенні при вибухових роботах (виключення випадків “вибивання” наблизжених до вибою рам).

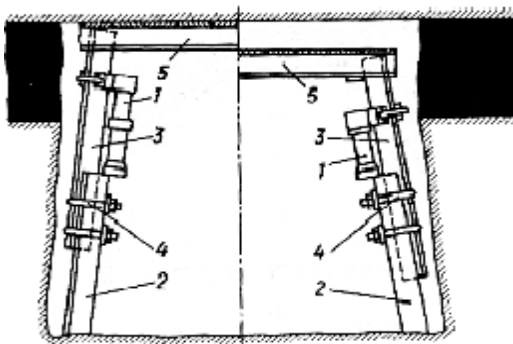


Рис. 6.29. Спосіб попереднього розпору рами:

- 1 – гідродомкрат; 2 – нижній елемент стояка;
3 – верхній елемент стояка; 4 – вузол податливості;
5 – верхняк

Розвиток адаптивних властивостей кріплення передбачає пристосування елементів його конструкції до особливостей розподілу навантаження та характеру зміщення порід. Це потребує оптимізації форми кріплення, підвищення працездатності вузлів податливості, раціонального компоновання несучих елементів та розташування вузлів на рамі. Серед найбільш простих та ефективних рішень цього напрямку зазначимо конструкцію трьохсегментного арконого кріплення спрямованої податливості (рис. 6.30). У ньому вузли 4 розміщено в площині 6, паралельній нашаруванню порід 5, центр верхняка 3 зорієнтовано по нормалі (n) до залягання порід, а стояки 1 та 2 виконані різної довжини, яку визначають за формулою:

$$\left. \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \end{matrix} \right\} = L_0 \pm R\alpha, \quad (6.1)$$

де L_1, L_2 – довжина стояків відповідно з боку підняття й падіння порід;

L_0 – довжина стояків при горизонтальному заляганні порід;

R – радіус кривизни склепіння;

α – кут залягання порід ($15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$).

Розроблена конструкція забезпечує рівномірність навантажень та зміщень у кожному вузлі податливості, мінімізує негативний вплив вигинного моменту наділянці напруги несучих елементів, збільшує стабільність податливої роботи конструкції. Запропоновані параметри нового кріплення зберігають розміри, типи спецпрофілів, радіуси кривизни елементів найбільш розповсюдженого кріплення КМП-А3, що дозволяє використовувати традиційну технологію виготовлення арочного кріплення і не потребує додаткового обладнання.

Для проектування кріплення як системи найменшої ваги та вартості необхідно, у відповідності із законом розподілу навантаження, розподілити матеріал конструкції таким чином, щоб забезпечити приблизно рівний запас міцності для всіх несучих елементів (див. формулу (1.7)).

Сучасні можливості обчислювальної техніки дозволяють за допомогою методу скінчених елементів моделювати роботу арочного кріплення, максимально наближену до фактичних умов взаємодії з гірським масивом. Згідно з розрахунковою схемою (рис. 6.31), довжину ділянки активно-

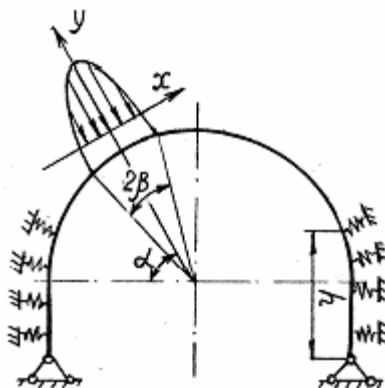


Рис. 6.31. Розрахункова схема арочного кріплення

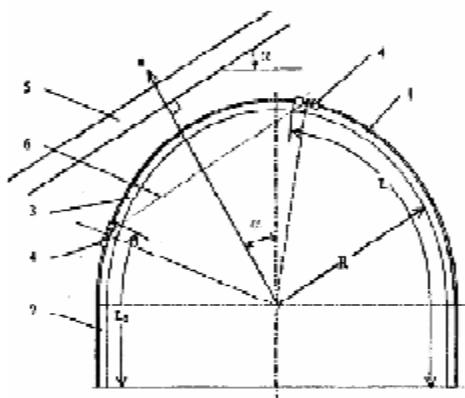


Рис. 6.30 Арочне трьохсегментне кріплення спрямованої податливості

гонавантаження виражено за допомогою кута контакту 2β , бісектриса якого співпадає з нормаллю до нашарування порід і задається кутом α , розподіл активного навантаження підпорядковано параболічному закону, а в боках виробки враховується реактивний опір порід. Результати розрахунків для типової рами КМП-А3 із СВП-27, при сумарному активному навантаженні 100 кН і боковому реактивному опорі 40 МПа наведено на рис. 6.32. Аналіз графіків свідчить, що із зменшенням розмірів ділянки активного нава-

нтаження від 120° (рис. 6.32, в) до 1° (рис. 6.32, а) величина максимальних напружень збільшується в 2,5 рази (відповідно зменшується несуча здатність кріплення). В умовах асиметричного навантаження арки (графіки 2; 3) максимальні напруження, що виникають по близу нормалі до нашарування порід, виявляються в 1,5–1,7 рази більшими, ніж в інших небезпечних перерізах, а довжина недовантаженої ділянки з боку підняття порід перебільшує 40% периметра арки.

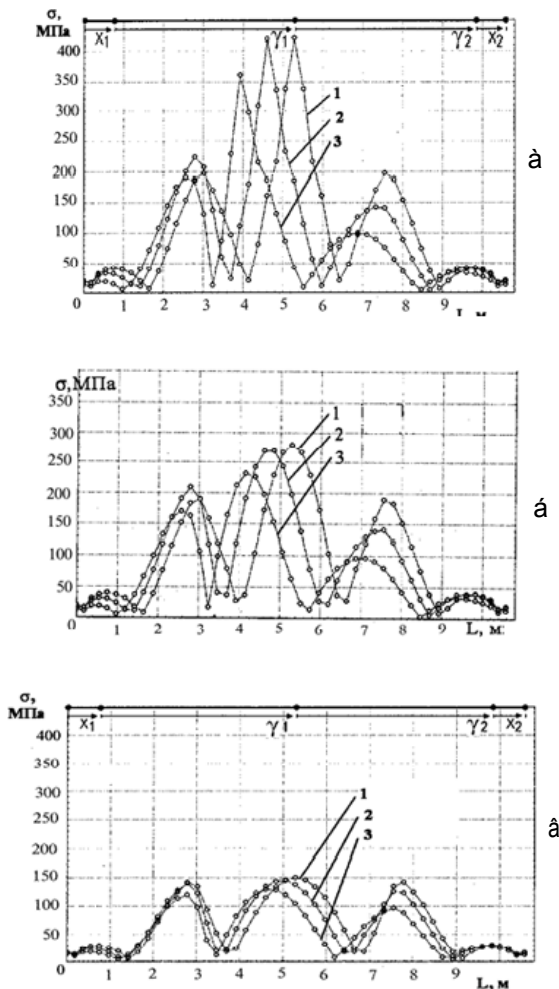


Рис. 6.32. Розподіл напружень по довжині периметра кріплення:

а – $2\beta = 1^\circ$; б – $2\beta = 40^\circ$; в – $2\beta = 120^\circ$

(графік 1 – $\alpha = 90^\circ$; 2 – $\alpha = 76^\circ$; 3 – $\alpha = 62^\circ$)

Вирівнювання діючих напружень вздовж периметра арки потребує відмови від принципу використання елементів однакової міцності. В умовах зосередження навантаження на ділянці склепіння арки, верхняк доцільно підсилювати елементом із спецпрофілю з одночасним створенням попереднього напруження рами (рис. 6.33).

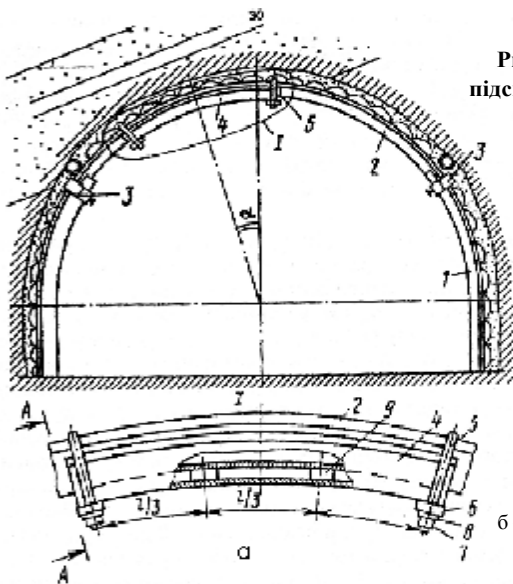
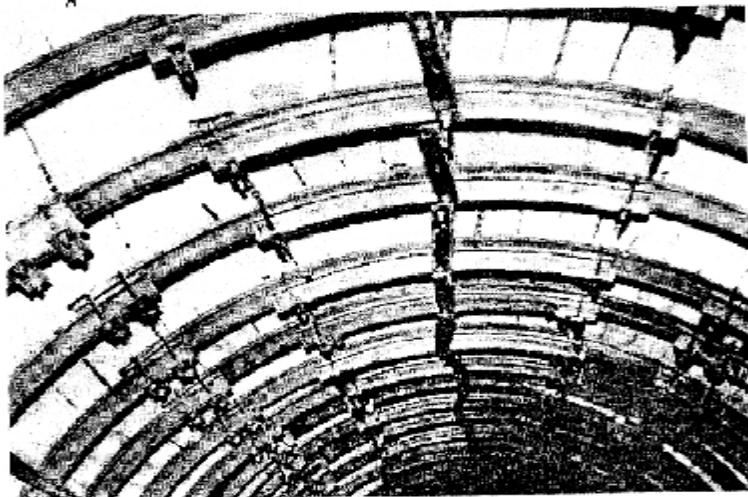


Рис. 6.33. Арочне підсилене кріплення:

а – конструкція;

б – застосування в польовому штреку



Підсилений верхняк складається із серійного верхняка 2 та елемента підсилення 4, який являє собою сегмент того ж радіуса кривизни, що й верхняк. Міжднищами профілів встановлені вкладиші 9, які при затисканні кінців підсилюючого елемента скобами 5, сприяють створенню вигинного моменту, напрямком дії якого протилежний зусиллям від навантаження кріплення. Завдяки подвійній жорсткості рамина ділянки підсилення та ефекту попереднього напруження забезпечується підвищення носійної здатності кріплення в 1,9–2,1 рази при збільшенні ваги конструкції лише в 1,2–1,25 рази. Це дозволяє перейти на більшу міжрамну відстань та економити без погіршення експлуатаційного стану виробки до 27 т металопродукату на кожних 100 погонних метрах.

Одним із напрямків вирівнювання діючих зусиль в елементах кріплення є застосування носійних елементів із профілів різної ваги.

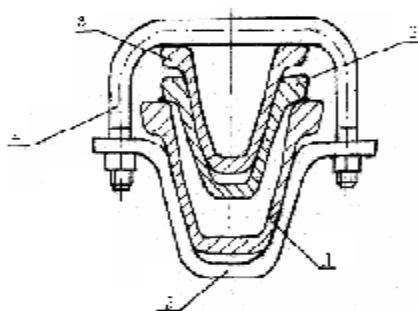


Рис. 6.34. Вузол для з'єднання спецпрофільів різної ваги

Він розвивається як з боку пристосування конструкцій різних профілів для спільної роботи, так і вдосконалення податливих з'єднань. Перспективним представляється вузол (рис. 6.34), у якому на більшшважком спецпрофілі верхняка 1 за допомогою зварювання закріплені вкладиш 5 (відрізок спецпрофілю меншого розміру), у якому встановлено полегшений стояк 3, виконаний з того ж профілю, що й вкладиш 2. Розмір вкладиша 2 повинен відповідати довжині напуску спецпрофілів (зазвичай 30 см), що зберігає нормативну характеристику податливості вузла. Заміна в умовах асиметричного навантаження (див. рис. 6.30, б) стояка кріплення, розташованого з боку підняття порід, з СВП-33 на СВП-22 забезпечує економію близько 60 кг прокату на кожній рамі.

Достатньо ефективним способом управління зусиллями в конструкції кріплення є створення попереднього напруження рами. Для більшості випадків (переважна навантаження з боку покрівлі) ідея способу полягає в створенні накінцях верхняка зосереджених зусиль, які формують пару вигинних моментів, протилежну зусиллям зовнішнього навантаження (рис. 6.35). Технологічно попереднє напруження створюють шляхом натягання домкратом канатної істяжки, закріпленої на кінцях верхняка; за допомогою гвинтових розпірних пристроїв, розміщених між породним контуром та рамою; шляхом “заневолювання” вузлами податливості кінців верхняка й стояків, що виконані з різною кривизною та ін. При цьому незначні витрати вих

матеріалів монтаж-
ного часу суттєво (в 1,3–1,5
рази) збільшують надійність
кріплення. Спосіб попере-
дного напруження тра-
пецієвидних конструк-
цій кріплення передба-
час передачу зусиль
від розпору
рама кінці консолей пря-
мо лінійно-го
верхняка (рис. 6.36).
Для реалізації способу не об-
хідно збільшити верхняк
2 надовжину консолей 1, збе-
рігаючи

проектнерозташування

стояків 5 та нормативну площу перерізу виробки. На кінцях консолей 1 встановлюють опори 3, які дещо перевищують товщину стіни та тяжки 4. Роз-
пірраміз здійснюють гідродомкратами 7 з подальшою фіксацією напру-
женого стану затягуванням податливих вузлів 8. При цьому консолі 1
через опори 3 входять в силовий контакт з породним оголенням 9, сприй-
мають навантаження розпору й створюють попереднє напруження вер-
хняка. При довжині консолей 35 см та зусиллях розпору по 50 кН носійна
здатність кріплення збільшується майже вдвічі (при додаткових витратах
матеріалу до 10%). Крім того, швидке введення кріплення в роботу відразу
гальмує процес руйнування порід. Умовою надійної реалізації способу

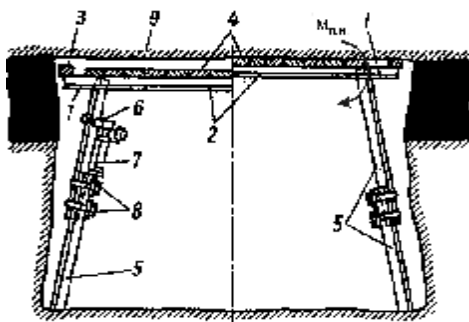


Рис. 6.36. Створення попереднього напруження трапецієвидної рами

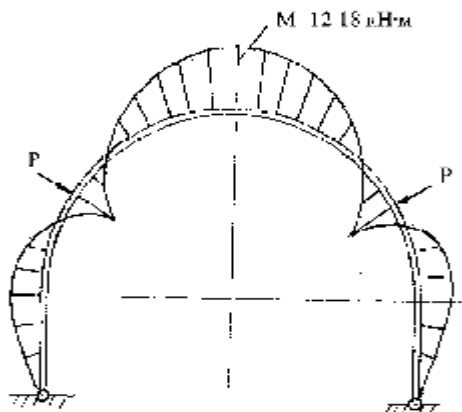


Рис. 6.35. Епюри вигинних моментів від попередньо напружуючих зусиль Р

є використання ефекти-
вних вузлів податливості
(див. рис. 6.7, в, г).

Таким чином, керу-
вання напруженим станом
кріплення дозволяє без сут-
тєвого збільшення його ва-
ги, за рахунок раціональ-
ного перерозподілу матері-
алу й попереднього напру-
ження конструкції привести
у відповідність один до од-
ного носійну здатність еле-
ментів рами.

Питання для самоконтролю:

- 1. Опишіть історію впровадження сталевих рамних кріплень у гірничу практику.*
- 2. Дайте характеристику шахтних профілів.*
- 3. Які конструктивні особливості та принципи роботи відрізняють вузли податливості рамного кріплення?*
- 4. Охарактеризуйте типи міжрамних огорож та шляхи їх вдосконалення.*
- 5. У чому полягає роль міжрамних стяжок, клинів та забутоків у забезпеченні працездатності рамного кріплення?*
- 6. Які конструктивні ознаки властиві для поширених типів арочного та трапецієвидного кріплення?*
- 7. Які засоби використовують для створення ефективної контактної взаємодії кріплення з породним масивом?*
- 8. У чому полягають основні способи управління напруженням станом рамного кріплення і як їх застосовують у гірничій практиці?*

7. ПОРОДОНОСІЙНІ КОНСТРУКЦІЇ КРІПЛЕННЯ

Армування гірських порід. Механізм роботи анкерів. Область їх застосування. Замковий беззамковий конструкції. Залізобетонні та сталеполімерні анкери. Монтаж і моніторинг анкерного кріплення. Породоносійні конструкції, утворені нагнітанням скріплювальної суміші в масив. Кріплення “Моноліт”. Поверхневий полімер-набризк.

7.1. Анкерне кріплення

7.1.1. Основні уявлення про механізм роботи анкерного кріплення

Розглянуті в розділах 2 – 6 конструкції кріплення характеризуються створенням підпору породного контуру виробок, що забезпечує опір розвитку деформацій масиву й гальмує утворення зони руйнування порід. Втім повністю зупинити ці процеси підпірне кріплення не в змозі. Тому стійкість виробки остаточно визначається саме величиною залишкової міцності деформованих порід, яка визначається силами тертя в блочній структурі масиву. З погляду на роль несучої здатності гірських порід виникла концепція зміцнення (армування) масиву за допомогою анкерів (знімецької буквально “якорів”) – стрижнів для скріплення породних шарів (блоків), які розташовують у гірському масиві по контуру виробки.

Перші свідчення застосування бамбукових анкерів для зміцнення масиву глинистих порід зафіксовані в Китаї і датуютьсякінцемІ тис. до Р.Х. Археологами знайдені оригінальні артефакти давньої гірничої технології, яка передбачала вдавлення анкерів у слабку породу. У Європі перше використання дерев'яного анкерного кріплення з цілинно-клиновим замком сталося 1900 р. у Верхній Сілезії (Польща). Початок застосування анкерів був пов'язаний з успіхами в технології буріння шпурів і створенні перфораторів машинного типу. Широке промислове впровадження розпочалося наприкінці 1940-х років у США та Австралії, де анкері поступово стали основним типом кріплення гірничих виробок у рудниках, а пізніше й у вугільних шахтах (переважно з короткими числивими вибоями). У 1959 р. вугільна компанія Круппав Ессені вперше застосувала полімерні ампули із синтетичними смолами для закріплення сталевих стрижнів у шпурах. З розробкою у 1990-х роках сталеполімерних анкерів нового покоління (носіючої здатністю 300–500 кН) анкерні системи знайшли широке застосування також на шахтах з довгими вибоями (лавами).

Уявлення про механізм роботи анкерного кріплення можна відобразити наступними випадками, які визначають умови його ефективного застосування:

1) пластислабких, схильних до розшарування порід безпосередньої покрівлі “підшиваються” доміцних порід основної покрівлі (рис. 7.1, а), причому роль анкерів зводиться до протидії зусиллям відділення слабких порід від потужного шару міцних та утримання ваги зруйнованих порід;

2) породи покрівлі тонкошаруватої текстури за допомогою анкерів “зшиваються” в єдине ціле, за аналогією до скріплення тонких дощок у складену балку (рис. 7.1, б, в), коли сумарний момент опору об’єднаних пластів значно збільшується; при цьому анкери пересікають площини послаблення (ковзання) породних шарів та створюють вздовж них додаткові сили тертя, що значно зменшує процес розшарування порід;

3) тріщинуваті породи покрівлі блочної будови обтискуються анкерами, які збільшують силу тертя вздовж тріщин та площин послаблення, створюють зону стискання, у котрій напруження розтягання зменшуються, а міцність на зсув зростає (рис. 7.2, а);

4) у покрівлі формуються штучна опора зона (рис. 7.2, б), причому високоміцні сталеполімерні анкери створюють систему породних опор, які взаємно пересікаються в поперечному й поздовжньому напрямках і стримують зміщення порід у виробку (необхідна відстань між анкерами 0,5–0,8 м);

5) анкери цілеспрямовано закладають під визначеними кутами до нашарування порід, для забезпечення ефекту самозаклинювання скріплених суміжних блоків при зміщенні у виробку.

У більшості випадків при застосуванні анкерного кріплення виробки мають прямокутну форму, причому анкери розташовують по нормалі до нашарування порід (у покрівлі) або перпендикулярно до плоскостей тріщин утворення (в боках); іноді використовують анкери у виробках арочної форми, розміщуючи їх в основному у склепистій частині симетрично вертикальній осі виробки (рис. 7.3). Умовами ефективного використання анкерів є якомога швидке зведення кріплення після оголення порід, створення зусиль їх обтискання (шляхом затягування гайок під анкерними плитами), монтаж анкерів максимально можливої довжини (у типових умовах 2–3 м).

Згідно з українськими нормативами, область застосування анкерного кріплення як самостійкої конструкції достатньо велика й включає практично всі типи виробок та гірничо-геологічних умов за винятком випадків:

- слабких, схильних до розмокання порід;
- наявності пливунів;
- закладання виробки на хрест простягання порід;

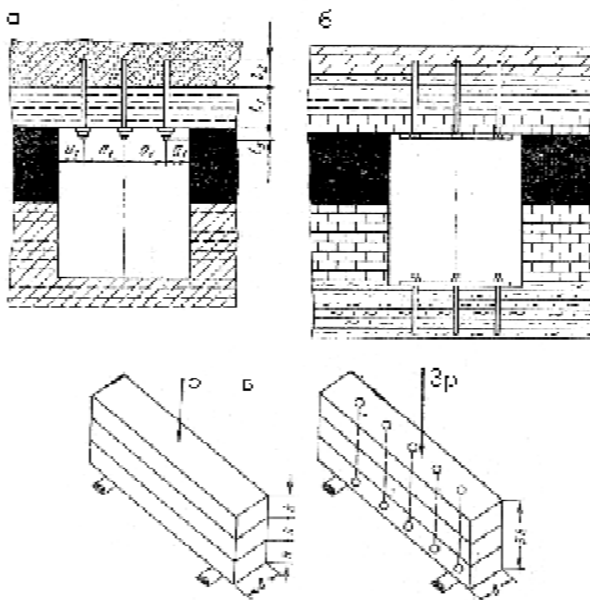


Рис. 7.1. Схеми роботи анкерного кріплення в породах шаруватой структури:

а – шари порід безпосередньої покрівлі «підшиті» анкерами до основної покрівлі; б – шари порід «зшиті» між собою анкерами; в – порівняння роботи окремих балок (шарів) із складеною балкою (армованими породами)

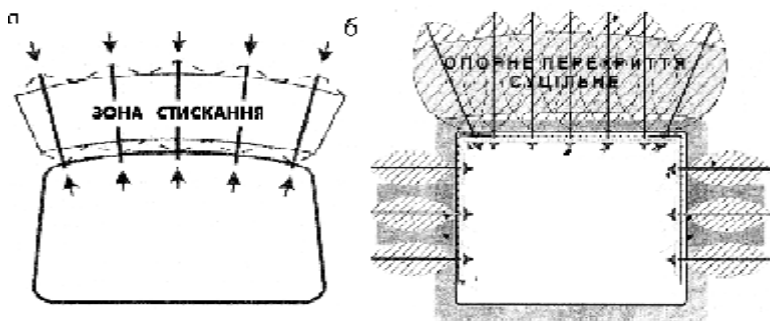


Рис. 7.2. Схеми роботи анкерного кріплення в породах блочної структури

а – зона стискання, утворена стягуванням анкерів; б – опорне суцільне покриття із сталеполімерних анкерів

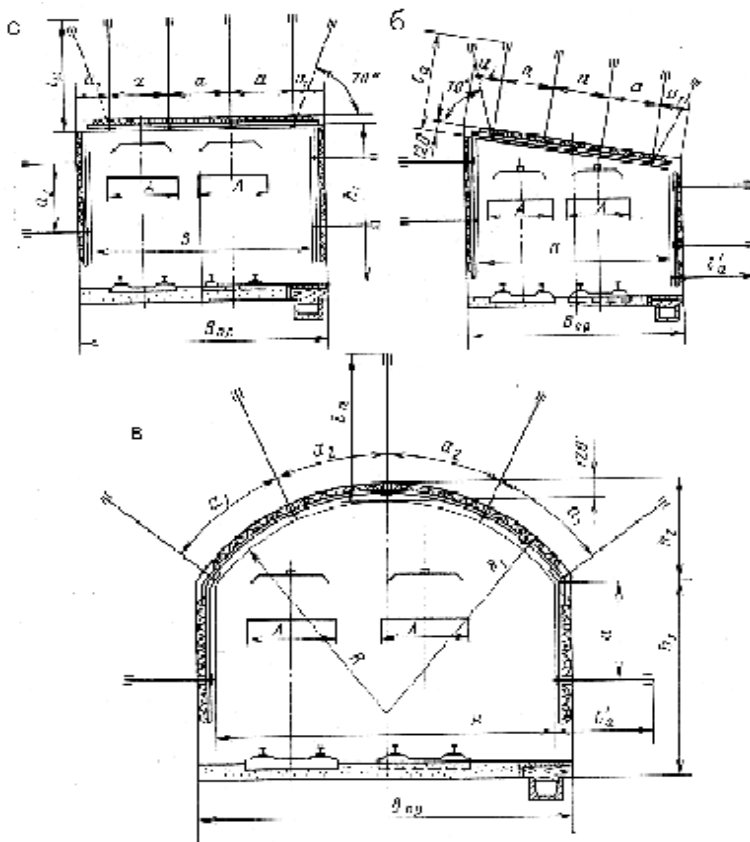


Рис. 7.3. Схеми типових перерізів виробок, закріплених анкерами:

а – прямокутної; б – трапецієвидної; в – склепистої форми

- проведення виробок у присічку долави;
- значного строку служби виробки (окрім залізобетонних анкерів).

Слід відзначити досвід позитивного впровадження сталеполімерного анкерного кріплення у відносно слабких породах та в прилеглих до лавиштреках, що свідчить про можливість розширення області застосування анкерів.

7.1.2. Типи конструктивні елементи анкерного кріплення

Велику кількість конструкцій анкерного кріплення (відомо близько 300 технічних рішень) поділяють на дві групи за характером закріплення анкера у шпурі. Розрізняють *замкові конструкції* (рис. 7.4, 7.5), у яких

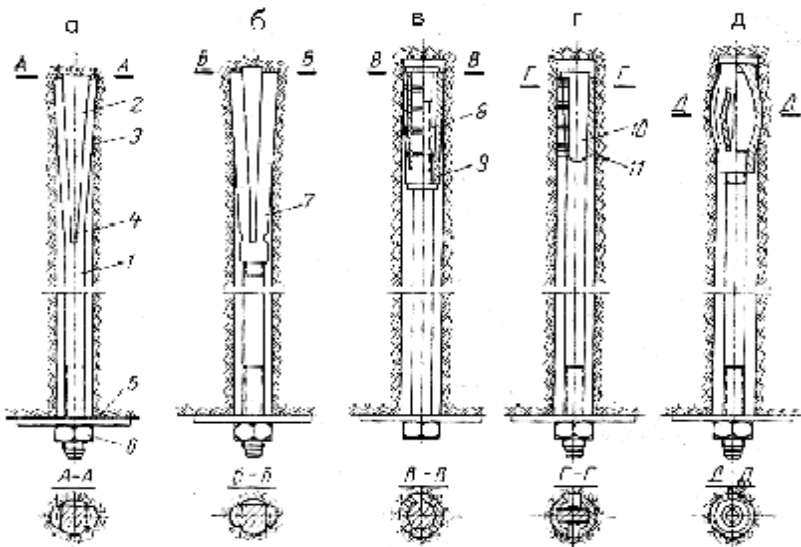


Рис. 7.4. Замкові конструкції анкерів:

а, б – із щілинно-клиновими замками; в, г – з розпірними головками та півмуфтами (лепестковими гільзами); д – з гільзою, яка закріплюється вибухом заряду ВР (1 – стержень; 2 – клин; 3 – «вуса» замка; 4 – щілина; 5 – опорна плита; 6 – гайка; 7 – знімна головка; 8 – конусна головка; 9 – лепесткова гільза; 10 – клинова головка; 11 – муфтова гільза)

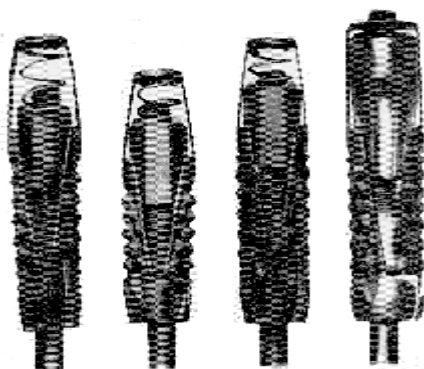


Рис. 7.5. Конструкції замків розпірних анкерів

контактна взаємодія анкера з породою здійснюється у донній частині шпур-ра, та беззамкові (рис. 7.6), у яких стержень закріплюють повсюд довжині шпура, як правило, за допомогою твердіючих сумішей. У першому випадку робота анкера проходить здебільшого у податливому режимі, оскільки зусилля проковзування замка у шпурі виявляються меншими ніж зусилля розриву стержня. Такі анкери зазвичай не можуть перешкодити розвитку зони руйнування, хоча помітно стримують цей процес. Технічні можливості беззамкових анкерів значно вищі, особливо у сталеполімерних конструкціях нового покоління. Вони працюють у жорсткому режимі й здатні привідповідній щільності установки блокувати розвиток зміщення порід, обмежуючи їх 20 - 50 мм. Руйнування беззамкового анкера виникає за рахунок розриву стержня.

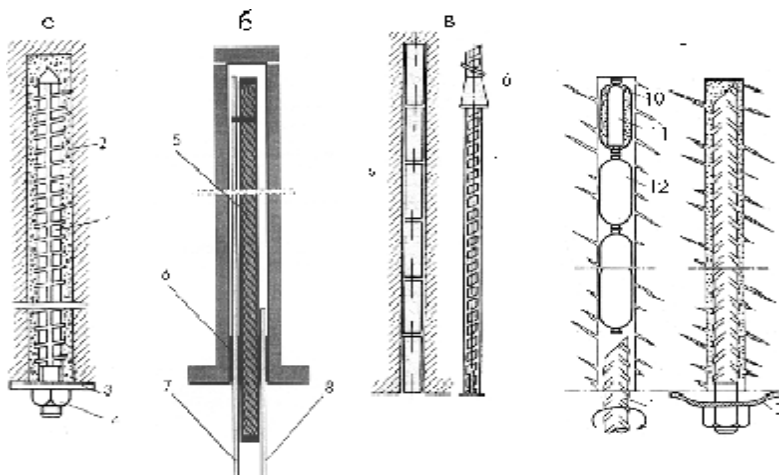


Рис. 7.6. Беззамкові конструкції анкерів:

а – набивний залізобетонний анкер; б – нагнітальний канатний анкер; в – патронований цементною сумішшю шпур та стержень; г – сталеполімерний анкер під час після зведення (1 – сталевий стержень; 2 – пісько-цементна суміш; 3 – шайба; 4 – натяжна гайка; 5 – сталевий канат; 6 – анкерна пробка; 7 – рукав для виходу повітря; 8 – рукав для ін'єкції цементної суміші; 9 – патрони з цементною сумішшю; 10, 11 – компоненти скріплювальної композиції; 12 – ампула)

Невід'ємними частинами анкерного кріплення виступають підтримуючі елементи: опорні шайби (плити), підхватити та тяжки (в основному сталеві решітчасті або сітчасті), що передають зусилля натягання анкера на контур порід і перешкоджають їх розшаруванню й обрушенню (рис. 7.7). Шайби (плити), які збільшують опорну поверхню анкера, виконують в основному з листової сталі плоскими або півсферичними (вразі похилого

розташування анкера, а також для забезпечення обмеженої податливості). Їх розміру випадку квадратної форми складає до 200х200х10 мм, діаметр круглої шайби – 150-200 мм. У нестійких породах застосовують поперечні підхвати, які виконують із тонколистової сталі або, в особливо складних умовах, із швелера чи спецпрофілю. Довжина підхватів дорівнює ширині виробки.

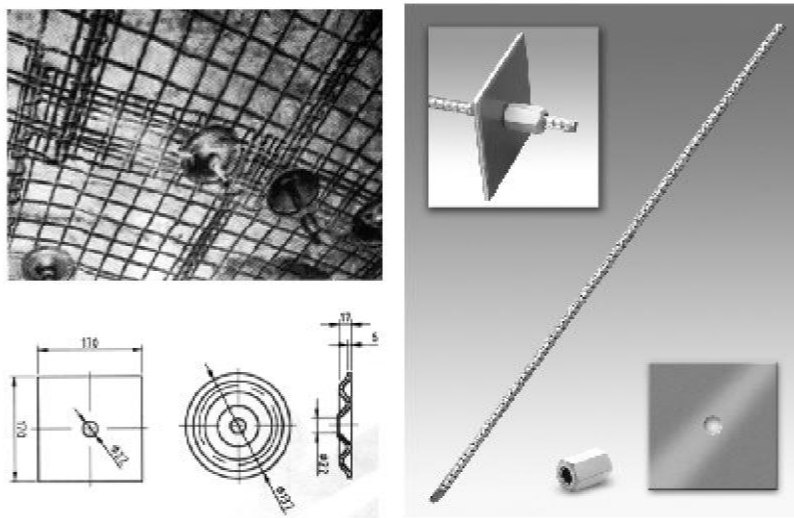


Рис.7.7. Опорні плити, шайби, зтяжки

До 1980-х років частіше застосовували замкові анкери, здебільшого розпірними головками (див. рис. 7.5). Конструкція розпірних анкерів передбачала накладання двох півмуфт розпірного стакана на головку анкера й поєднання їх між собою за допомогою дротяного чи резинового кільця. При монтажі анкер встановлювали в монтажну трубу, яка верхнім кінцем опиралася на однорозпірного стакана, і вводили її у шпур. Для переміщення розпірного стакана у донну частину шпура вдарили по кінцю труби (при цьому півмуфти розсувалися й зчіплювалися з породою). Після виїмання труби встановлювали опорну плиту й закручували гайку. Натягання стержня (до 30 кН) приводило до зміщення вниз розпірної головки й силового розсування контактних поверхонь півмуфт у стінки шпура. Як можна помітити, монтаж замкових анкерів не достатньо підлягав механізації.

Слід відзначити, що носійна здатність замкових анкерів залежить від багатьох впливових факторів (у першу чергу від міцності порід), часто має випадковий характер і коливається від 30 до 100 кН (у міцних породах). При цьому надійність анкера визначається нерозривом сталевостержня, який

має достатній запас міцності, а зусилля мпроковзування замка у шпурі. З початком проковзування носійна здатність анкера може значно зменшитися. Для більш надійного закріплення анкерів були розроблені конструкції

3

подвоєними чи видовженими замками (з метою створити більшу площу контакту замка зі стінками шпура). Складність виготовлення, висока ціна й недостатня надійність таких конструкцій обмежили розвиток цього технічного напрямку. Основним шляхом підвищення надійності анкерного кріплення стало утримання стержня повсій довжині шпура за допомогою цементних або полімерних сумішей (технологія армування порід).

Залізобетонні анкери (див. рис. 7.6) складаються із сталевостержня періодичного профілю або каната, пісково-цементної суміші, якою заповнюють шпур, ущільнювального кільця й натяжної гайки. У більшості випадків сталевий стержень вводять у шпур, уже заповнений розчином цементної суміші (набивний анкер, див. рис. 7.6, а). Іноді спочатку вставляють анкер, а потім (або одночасно) проводять ін'єкцію у шпур твердого розчину (нагнітальний анкер). Такий спосіб закріплення найбільш характерний для канатних анкерів (рис. 7.6, б). Вельми перспективною є технологія патрунування шпура ампулами із сухою сумішшю й водою

(див. рис. 7.6, в; рис. 7.8) з наступним введенням та обертанням арматурного стержня. Це суттєво спрощує й прискорює монтаж анкера, забезпечує його підвищену міцність. За звичай натягання стержня проводять за 3-5 годин.

Носійна здатність звичайних залізобетонних анкерів складає 80-120 кН, канатних - до 250 кН.

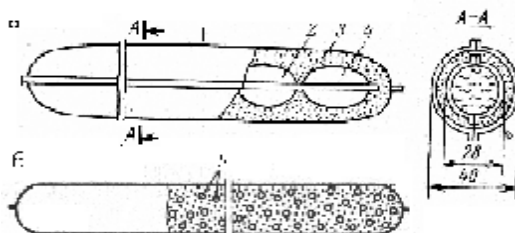


Рис. 7.8. Конструкції патронів з цементними сумішами:

а - з внутрішніми ампулами; б - з мікрокапсулами (1 - зовнішня оболонка; 2 - внутрішня ампула; 3 - суха цементна суміш; 4 - вода; 5 - мікрокапсули з водою)

Перевагами кріплення цього типу є простота конструкції, можливість ефективного застосування в різних породах, практично необмежений строк служби, низька вартість (цементні суміші майже на порядок дешевші за полімерні). Стримуючим фактором широкого застосування залізобетонних анкерів є та обставина, що вони здатні приймати навантаження тільки після набору бетоном необхідної міцності (10-12 годин), а нормативна несуча здатність забезпечується тільки за 1-2 доби. Для прискорення процесу твердіння можливе використання особливих цементних сумішей із додаванням прискорювачів твердіння (зазвичай - рідкого скла).

Гірничим бюро США розроблена мікрокапсульна скріплююча суміш “Кемікрон2000”, яка забезпечує вже через 3 хвилини після монтажу залізобетонного анкера носійну здатність близько 90 кН. Проте швидке введення в роботу анкера потребує суттєвого збільшення ціни особливої цементної суміші, наближуючи її до синтетичних закріплювачів.

Найбільше поширення у сучасній практиці анкерного кріплення отримали *сталеполімерні конструкції* (рис. 7.6, г), особливо в умовах нестійких, тріщинуватих порід, а також (завдяки високій технологічності монтажу) при швидкісному спорудженні гірничих виробок. Засобом закріплення сталевих стержнів є полімерні композиції на основі епоксидних, поліефірних та фенолоформальдегідних смол, поліуретанових та фуранових складників, а також мінерально-органічних сумішей. У початковому стані компоненти закріплювача розміщують у ізольованих один від одного відділеннях ампул (рис. 7.9). Під час введення й обертання стержня ампули рухаються, їх складові з'єднуються й перемішуються, а суміш отримує здатності швидкого твердіння й високої адгезії до стінок шпурів і матеріалу стержнів.

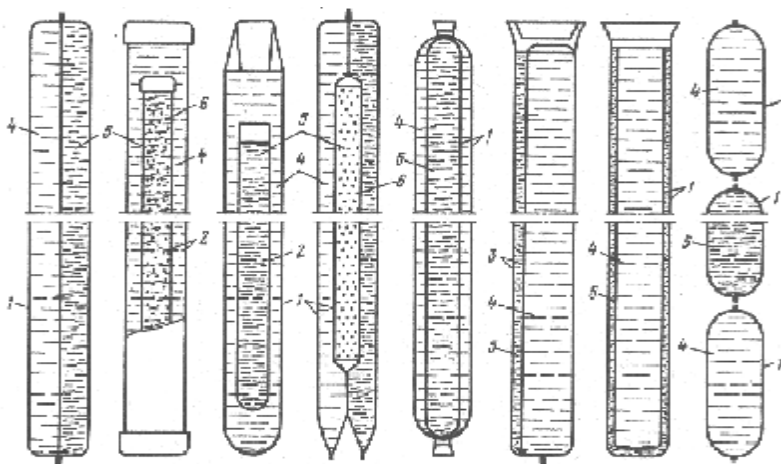


Рис. 7.9. Конструктивні рішення ампул із скріплювальними хімічними композиціями:

1, 2, 3 – плівкова, скляна й паперова оболонки; 4 – синтетична смола;
5 – затужавлювач; 6 – наповнювач

Носійний елемент (сталевий стрижень) виконують із арматурного періодичного профілю. Поперечні виступи профілю повинні забезпечувати перемішування компонентів і транспортування суміші від донної до забойної частини шпура (при обертанні стержня), а також укладку та утри-

мання суміші в просторі між стінкою шпура й анкером. Головну частину стержня з метою надійного руйнування оболонки ампули запобігання її зминання виконують гостро заточеною (див. рис. 7.6, г), або розрізаною на довжину 40–50 мм з відгинанням кінців у протилежні боки (рис. 7.10, а). На вихідній частині анкера на довжині до 150 мм виконують різьбу для необхідного натягання стержня після його закріплення у шпурі. Міцність на розрив стержнів нового покоління складає для діаметрів 25, 27 та 30 мм – відповідно 250, 350 і 500 кН.

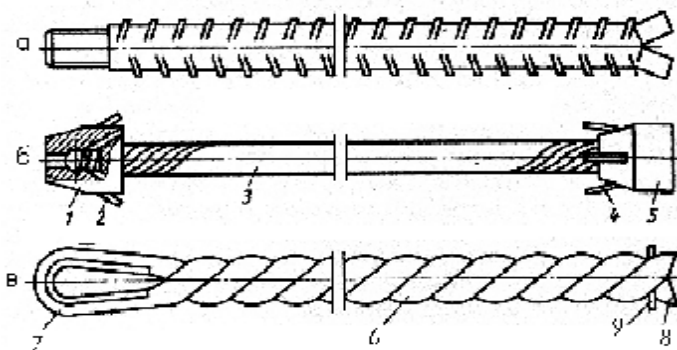


Рис. 7.10. Конструкції стержнів:

а – із арматурної сталі; б – канатний; в – кручений склопластиковий
(1, 5 – сталеві анкерні пробки; 2, 4 – фіксатори; 3 – сталевий канат; 6 – пасма скловолокна; 7 – вантажний вузол; 8 – «вуса»; 9 – шплінт)

Важливою складовою ефективної роботи анкерів є точне дотримання заданих параметрів шпурів: місця розташування, просторової орієнтації, довжини й діаметра, прямолінійності та якості поверхні. Особливою вимогою є забезпечення розмірів вільного кільцевого простору між стержнем і стінками шпура (рис. 7.11). Діаметр шпура повинен перебільшувати діаметр стержня на 6–8 мм, що забезпечує необхідні умови для раціонального руйнування ампул, ефективного перемішування смоли й затужавлювача, розповсюдження суміші по всьому кільцевому простору. Якісна поверхня шпура передбачає утворення необхідної шорсткості, яку забезпечують додатковим швидкісним проходженням бурового інструменту по простору підготовленого шпура.

Слід відзначити, що сучасні міцні закріплювачі гарантують нормативну носійну здатність анкера – 150 кН (стержень із звичайної арматурної сталі), а в особливих конструкціях – від 250 до 500 кН. При цьому зусилля руйнування полімеру в кільцевому просторі шпура (з урахуванням контактного зчеплення) не поступає міцності сталевостержня, що свідчить

про оптимальні параметри конструкції. Сталеполімерний анкер вступає в роботу практично відразу після встановлення, оскільки процес полімеризації (твердіння) суміші займає лише кілька хвилин. Висока технологічність і механізація монтажу сталеполімерних анкерів (див. наступний підрозділ) забезпечують необхідні темпи спорудження виробок і суттєво підвищують конкурентоздатність цього типу кріплення. До недоліків синтетичних закріплювачів слід віднести високу вартість та обмежений строк служби (до 5 років).

Останнім часом, розвиваючи полімерні технології, використовують також сталеві канатні анкери (див. рис. 7.10, б), які закріплюють шляхом нагнітання хімічних сумішей у шпур під значним тиском, що створює умови для натягання каната. Скріплюючий розчин подається через нижню пробку 1 анкера. Кінцева пробка 5 утримується у донній частині шпура пружинними фіксаторами 4. Після закінчення процесу нагнітання фіксатори 2 пробки 1 створюють умови розпору каната (до полімеризації у шпурі хімічної суміші). Канатні анкери можуть забезпечувати ще більш високу навантаження (до 600 кН) і слугувати вантовими опорами для підвищення верхніх кріплень, монорейок тощо.

Склопластикові стержні мають високу, подібну до сталі, міцність на розтягання й відносно малий опір на різання. Це робить переважною областю їх застосування породні або вугільні масиви, що не виключають подальшої розробки й дії ріжучих органів гірничих машин. Найбільш ефективним завдяки рельєфній поверхні й підвищеній міцності зчеплення з хімічним закріплювачем вважають кручений склопластиковий анкер (див. рис. 7.10, в), який утворюють з звивання двох пасів скловолокна 6, просякненого синтетичною смолою. Вантажний вузол анкера 7 виконують у вигляді петлі. Кінцева частина анкера являє собою два різаних джгути 8 (т. зв. "вуса"), щорозведені в різні боки, та сталевий шплінт 9. Така конструкція забезпечує можливість руйнування ампул у шпурі.

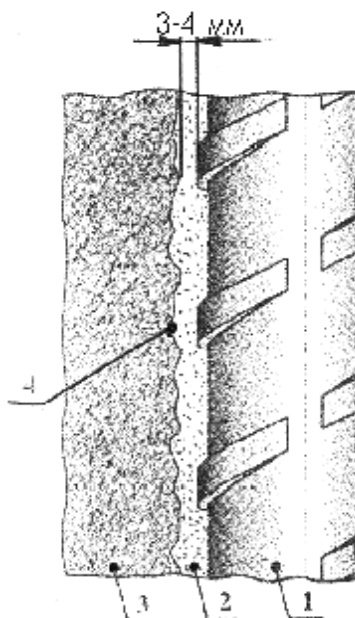


Рис. 7.11. Стержень у шпурі:

1 – сталевий стержень із серповидними поперечними виступами; 2 – полімерна суміш; 3 – оточуючі шпур гірські породи; 4 – насічки для створення шорсткості стінок шпура

Перспективним напрямком розвитку беззамкових конструкцій є створення анкерів у вигляді тонкостінних сталевих трубок, які закріплюються у масиві шляхом збільшення діаметра трубки під час установки (рис. 7.12). Матеріал при цьому підтримується за допомогою високої сили тертя між стінками шпурів та анкера. Їх несуча здатність відразу після встановлення сягає до 500 кН, час монтажу не перебільшує 5-7 хвилин, але потребує спеціального обладнання для створення імпульсного розсування оболонки анкера.

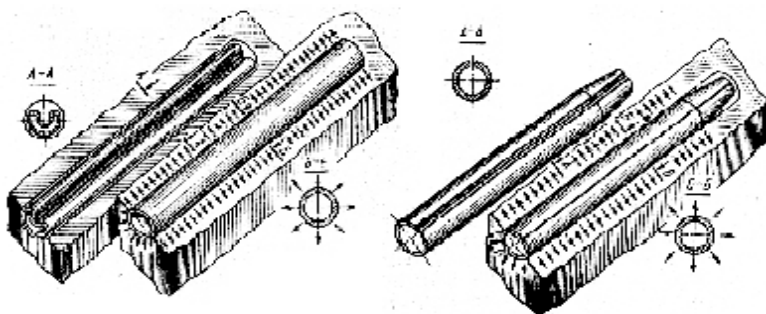


Рис. 7.12. Беззамкові анкери із тонкостінних сталевих трубок

Цікавою можливістю армування слабких порід є спосіб силового вдавнення сталевих стержнів у породу. Він виключає необхідність буріння шпурів і штучного закріплення анкерів. Працездатність анкера забезпечується силами тертя між породою та стінками стержня. Параметри цього способу і пристрої для вдавнення анкерів у гірську породу знаходяться в стадії експериментальних впроваджень.

Підсумовуючи огляд конструкцій анкерного кріплення, відзначимо його значні можливості для економії ресурсів, підвищення безпеки гірничих робіт, швидкісного спорудження виробок. Широке промислове впровадження анкерного кріплення здійснюється на основі новітніх високих технологій (високоміцні матеріали стержнів і закріплювачів, обладнання й машини для механізації монтажу). Область ефективного застосування анкерів постійно розширюється.

7.1.3. Технологія монтажу сталеполімерних анкерів

Оскільки конструктивні особливості й робочі характеристики беззамкових анкерів, які передбачають патрунування шпурів ампулами з синтетичними клеями (або цементними сумішами), значною мірою пов'язані з виконанням монтажних робіт, зупинимося більш докладно на широко розповсюдженій британській технології армування порід з використанням переносних бурових колонок (рис. 7.13–7.16).

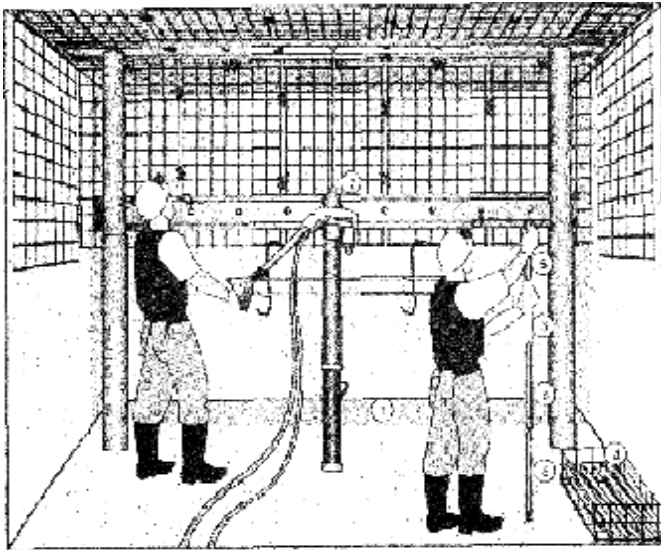


Рис. 7.13. Буріння шпурів і підготовка ампул:

1 – технологічна заходка; 2 – обмежувач довжини шпура; 3 – аплікатор;
4 – скринька для зберігання ампул; 5 – патрон із швидкотвердіючим
закріплювачем; 6 – патрон з повільним затвердінням

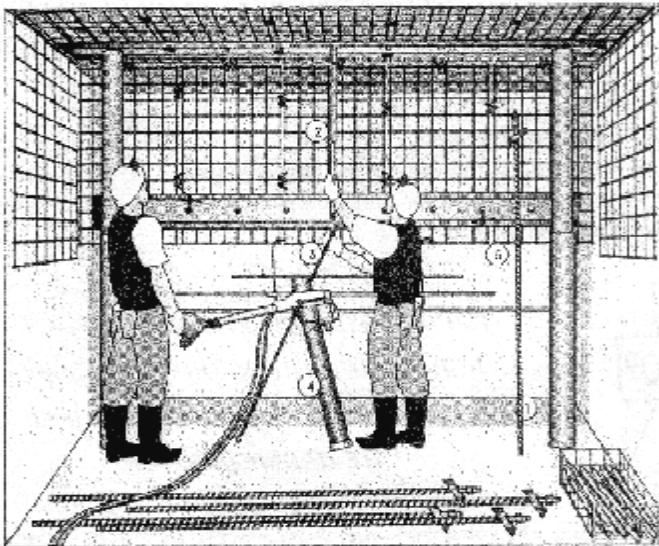


Рис. 7.14. Встановлення в шпур патронів із закріплювачем:

1 – технологічна заходка; 2 – аплікатор з патронами; 3 – набійка (жердина);
4 – буроколонка; 5 – сталевий стержень

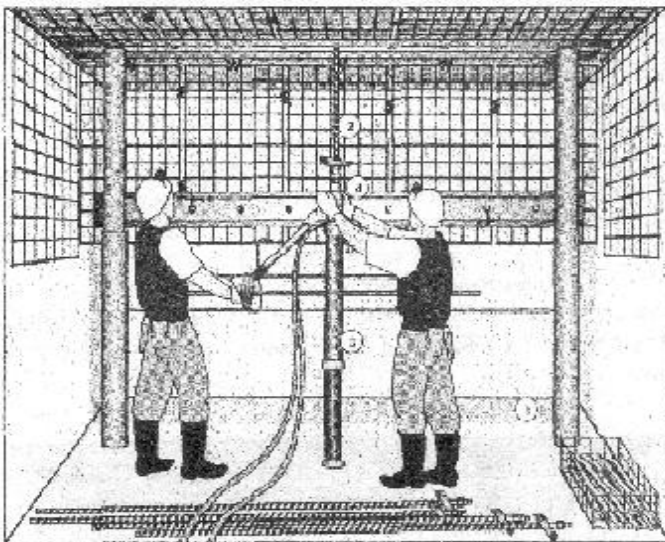


Рис. 7.15. Встановлення анкерного стержня:

1 – технологічна заходка; 2 – сталевий стержень; 3 – бурова колонка;
4 – адаптер для встановлення стержня;

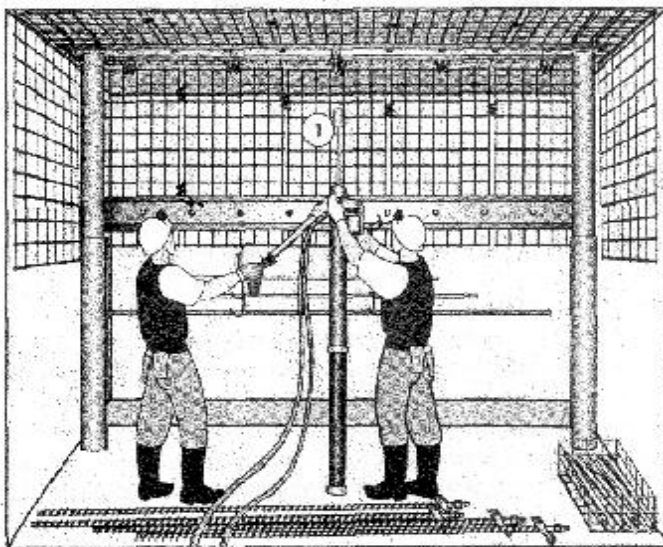


Рис. 7.16. Затягування анкерних гайок (1 – гайковерт)

Анкерне кріплення зводиться у виробі прямокутного поперечного перерізу. Устаткування для прохідницьких робіт повинно знаходитися за межами забівної частини виробки. Наділяючи заходки у покрівлі, боках і торця виробки навішуються решітчасті затяжки, які скріплюються пружинними з'єднувачами. Стояки тимчасового кріплення встановлюють під підхват і розпиряють між підшоною покрівлею виробки (намісці постійного розташування підхвату).

Розмітка шпурів забезпечується отворами в підхваті, які розміщені згідно з паспортом кріплення. Бурову колонку встановлюють під підхватом напроти отвору під анкерний стрижень. Першим монтується анкер у центрі прольоту (див. рис. 7.13), потім усі анкери з одного боку, далі – з іншого. Спершу передбачається буріння короткою штангою з наступним очищенням шпура (повільне підняття й опускання бурової коронки в шпур із промивкою, наповних обертах). Далі коротку штангу замінюють на довгу і пробурюють шпур на паспортну глибину (у типових виробках висотою 2,8 м довжина шпура складає не менше 2,25 м). Для дотримання заданої довжини на бурову штангу вдягають обмежувач. Створення необхідної шорсткості поверхні шпур досягають підняттям штанги з ріжучою коронкою від устя до донної частини, при цьому забезпечують максимальноможливу швидкість подачі й обертання штанги (не припиняючи процесу промивання).

Патрони із закріплювачем для зручності подавання в шпур встановлюють у аплікатор (тонкостінну пластикову трубу), причому у його нижній частині розміщують фіксатор для запобігання випадіння ампул, потім патрон із повільним затушовуванням, а верхнім – патрон із швидкотвердіючим компонентом (див. рис. 7.13). Аплікатор з патронами (ампулами) вводять у шпур, піднімаючи набійкою (жердиною) до упирання (див. рис. 7.14). При тримуючи фіксатор і патрони набійкою, аплікатор висовують із шпура.

Перед введенням анкерного стрижня на його різьбовій частині розміщують опорну шайбу й накручують гайку. Верхню частину стержня вводять у шпур, а нижню (за допомогою спеціального адаптера) поєднують з буровою колонкою. Стержню надають обертово-поступальний рух до повного занурення в шпур (рис. 7.15), що приводить до руйнування ампул і заповнення кільцевого простору скріплювальною сумішшю.

Стержень утримується кілька хвилин у нерухомому стані (відповідно до інструкції щодо застосування ампул), що забезпечує стабільне протікання процесу полімеризації й досягнення початкової несучої здатності закріплювача. Потім проводять натягання стержня (рекомендоване зусилля складає 50 кН). Для цього (рис. 7.16) на буровій колонці монтують гайковерт, підводять його до виступаючого із шпура кінця стержня й надають гайці обертовий рух. Довжина хвостовика за гранню гайки не повинна перебільшувати 80 мм.

Час кріплення одного анкера складає 6–10 хвилин. Роботи з монтажу можуть вестися за допомогою кількох бурових колонок одночасно. Вельми перспективним є застосування спеціальних машин для анкерування порід (рис. 7.17), які повністю механізують процес буріння шпурів і монтаж стержнів, а також маніпуляторів на прохідницьких комбайнах.

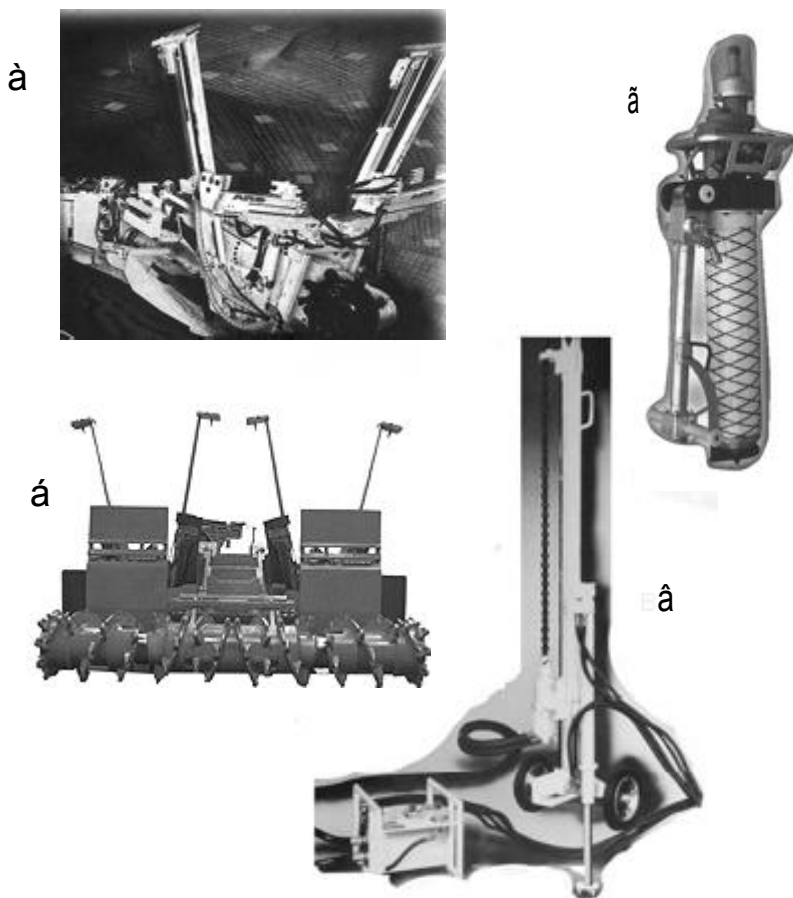


Рис. 7.17. Анкероустановники:

а, б – на прохідницьких комбайнах; в – з колесним ходом; г – переносний

7.1.4. Моніторинг анкерного кріплення

Важливою та невід’ємною складовою безпечного й ефективного застосування анкерного кріплення є інструментальні спостереження за станом оточуючих порід, контроль якості монтажних робіт, стеження за рівнем навантажень і деформацій анкерів. Основи моніторингу анкерного кріплення розглянемо на базі польського досвіду, який є найбільш характерним для початкового періоду освоєння анкерних технологій.

Спостереження поділяють на 3 стадії: початкову, монтажну й робочу. Метою моніторингу на початковій стадії є уточнення стану гірського масиву й необхідних параметрів анкерного кріплення (довжини й відстаней між анкерами). Слід звернути увагу, що несуча здатність анкера, яка дорівнює зусиллю витягання закріпленого стержня із шпура, не тотожна несучій здатності підпільного кріплення. Так, сталева рама й сучасний сталеполімерний анкер мають приблизно рівну носійну здатність (близько 300 кН), але для забезпечення відповідного рівня стійкості виробки, замість однієї рами, треба застосувати 5-9 анкерів. Це пояснюється механізмом роботи анкерного кріплення (див. підрозділ 7.1.1), у якому головним носійним елементом виступають гірські породи. Саме від міцності та деформаційних властивостей порід у масиві; від кількості, орієнтації й глибини розповсюдження тріщин будуть залежати можливості ефективного застосування анкерів та їх параметри. Тому в місці закладання виробки проводять комплексні дослідження масиву.

У покрівлю бурять свердловини довжиною 6 – 8 м з отриманням кернового матеріалу. Аналізують число відокремлених частин керну (характеристика тріщинуватості), а зразки порід випробують на стискання, розтягання й розмокання. Поруч з лабораторними випробуваннями проводять дослідження міцності порід безпосередньо в масиві за допомогою пенетрометра (рис. 7.18, а). Метод ґрунтується на фіксації тиску при вдавлюванні індентора у стінку свердловини. Випробування здійснюють від устя до на свердловини через кожні 10–20 см. Через розрахунок коефіцієнти визначають міцність порід у масиві на стискання й розтягання й будують діаграму їх розподілу по глибині (рис. 7.18, б).

Для додаткової оцінки розподілу тріщин у дослідних свердловинах проводять інтроскопію масиву за допомогою відеокамери в інфрачервоному спектрі (рис. 7.19). Зонд камерою вводиться у свердловину й відображується на екрані монітора (фіксує на цифрових носіях) стан оточуючих порід, їх розшарування й тріщини. Обладнання дозволяє оцінювати кількість, місця знаходження (відстань від устя свердловини), кут залягання й величину розкриття (від 0,1 мм) усіх тріщин, що пересікають свердловину. Особливе значення має стан масиву на глибині, що перебільшує довжину анкерів. У разі виявлення значних розшарувань тріщин вище зони анкерування, тре-

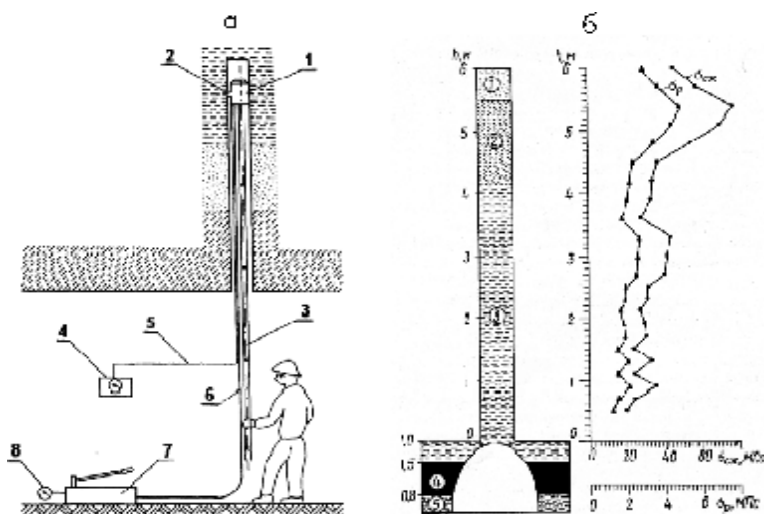


Рис. 7.18. Схема пенетрометричних досліджень (а) та діаграма розподілу міцності порід у масиві (б):

1 – головка; 2 – індентор; 3 – складена трубка; 4 – електричний показник спрацьовування індентора; 5 – електричний провід; 6 – гідравлічний кабель; 7 – насос; 8 – манометр

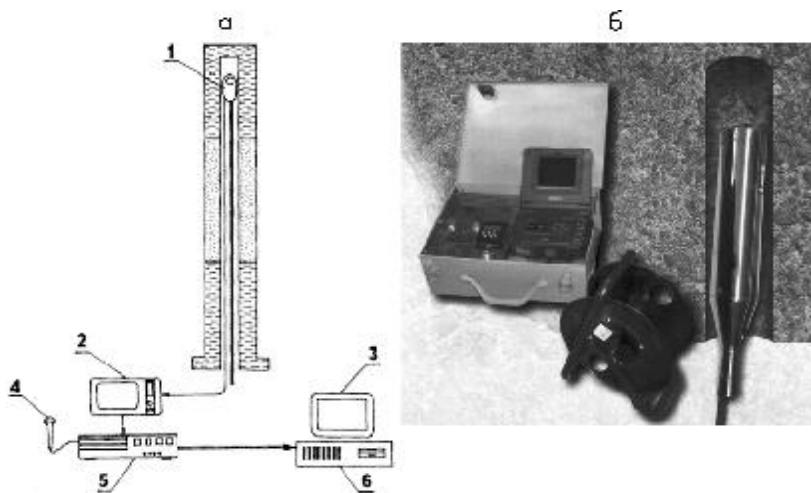


Рис. 7.19. Схема свердловинної інтроскопії породного масиву (а) та відеокамера інфрачервоного спектру з системою управління (б):

1 – камера; 2,3 – монітори; 4 – мікрофон; 5 – відеомагнітофон; 6 – комп'ютер

ба збільшити довжину анкерів або відмовитися від анкерного кріплення як самостійної конструкції.

Зазвичай пенетрометричні й відеокамеральні дослідження продовжують також на третій (робочій) стадії моніторингу, причому відстань між дослідними свердловинами не повинна перебільшувати 100 м.

Монтажна стадія моніторингу передбачає контроль якості робіт при зведенні анкерного кріплення. Необхідно відслідковувати технологічні помилки й не допускати:

- перебільшення максимально допустимого відставання кріплення від вибою виробки, оскільки в цьому випадку навіть якісний монтаж не рівне в змозі перешкодити процесу розшарування порід;

- встановлення стержнів у недобурені шпури, що надає можливості прижати шайбу до породи й натягти анкер (із-за обмеженості різьбової ділянки);

- неповного заповнення шпура закріплювачем, що знижує несучу здатність анкера;

- наявності порожнин під опорною шайбою, що збільшує час введення анкера в роботу та знижує його ефективність;

- неякісного монтажу з утяжкою, що призводить до обсіпання порід розвантаження анкера.

У випадку незадовільного встановлення анкера необхідно пробури-ти поруч новий шпур і закріпити додатковий анкер. Необхідне зусилля натягання анкерів забезпечується конструкцією гайкової шайби, але час від часу воно контролюється індикаторними прокладками або динамометричним ключем.

У робочій (основній) стадії моніторингу відслідковують зміщення порід у масиві й на контурі закріпленої виробки, навантаження анкерів та їх деформації.

Для оцінки зміщень породного контуру облаштовують замірні станції з маркшейдерськими реперами, які служать пунктами щомісячних замірів конвергенції порід. Нарис. 7.20 подані типові схеми вимірювання розмірів поперечного перерізу виробок різної форми. Заміри можуть сигналізувати про наближення небезпечної ситуації, дозволяють контролювати збереження необхідних транспортних зазорів, проходів для людей тощо.

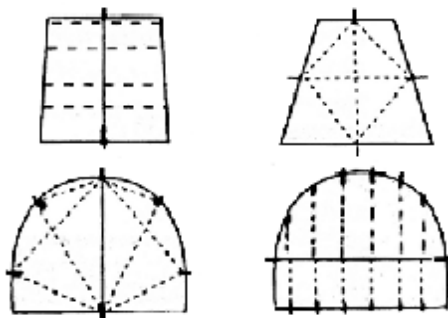


Рис. 7.20. Типові схеми реперних станцій

Розшарування порід у масиві відслідковують за допомогою струнних свердловинних вимірювачів (рис. 7.21, а), у яких пружинні пристрої розташовують на відстані 0,5–1 м один від одного. Зміщення струн характеризують розшарування порід по довжині свердловини. Заміри ведуть на т. зв. «високому» й «низькому» рівні (рис. 7.21, б). Перший характеризується глибиною, яка вдвічі перебільшує довжину анкера (але не менша 4,5 м), й свідчить про розвиток деформацій над опорно-анкерним перекриттям. Другий рівень вище на 0,3 м перебільшує довжину анкера й відслідковує за допомогою сигнальних покажчиків допустимі критичні зміщення порід. Вельми ефективним способом дослідження розшарувань порід є також відеокамеральна інтроскопія масиву (див. рис. 7.19). У разі реалізації критичних зміщень, що регламентовані величиною $(0,02–0,04)L$ (де L – сумарна товщина скріплених анкерів порід), проводять підсилення кріплення.

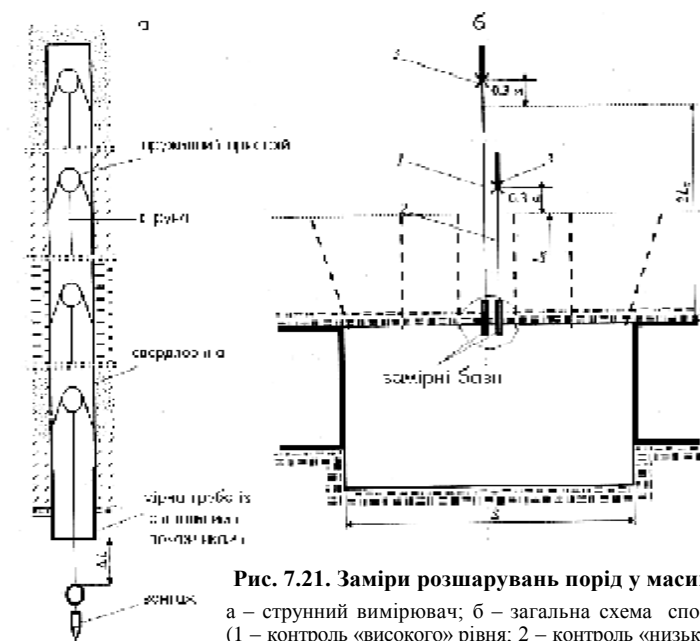


Рис. 7.21. Заміри розшарувань порід у масиві:

а – струнний вимірювач; б – загальна схема способу (1 – контроль «високого» рівня; 2 – контроль «низького» рівня; 3 – місце закладання вимірювача)

Обов'язковою частиною моніторингу є дослідження навантаження анкерів за допомогою динамометричних приладів, що розміщують між породами покрівлі та опорною плитою, або тензометричних датчиків. В останні роки широко застосовують автоматичні системи контролю навантаження анкерів, які відслідковують ситуацію в багатьох замірних пунктах

одночасно. Прикладом такого обладнання є система моніторингу MONAKOT (рис. 7.22), що розроблена у Краківській гірничо-металургійній академії. Вимірювання виконують тензометричними датчиками, які розміщені по довжині стержня (дев'ять тензодатчиків на кожен анкер). Система MONAKOT може одночасно обслуговувати 50 анкерів, які об'єднують 450 замірних пунктів.

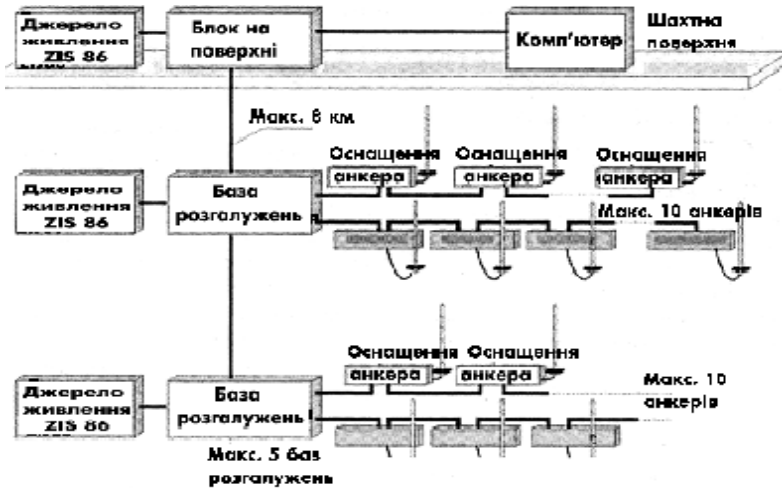


Рис. 7.22. Блок-схема анкерного моніторингу MONAKOT

Система забезпечує:

- необхідну для прийняття об'єктивних рішень частоту замірів;
- обсервацію розподілу напружень (навантажень) по довжині анкера;
- автоматизований збір, обробку й архівування результатів досліджень, у т. ч. в графічному вигляді по довжині анкера і вздовж виробки;
- сигналізацію аварійних станів: досягнення небезпечної межі навантаження (80% граничного); початок пластичності, розрив стержня.

Таким чином вдається надійно контролювати процес роботи анкерного кріплення, а в разі фіксації порушень технології чи небезпечних змін геомеханічної ситуації, своєчасно проводити роботи по підсиленню конструкцій. Вартість регулярних моніторингових досліджень повинна обов'язково входити в загальну ціну проекту анкерного кріплення виробки.

7.2. Зміцнення породних конструкцій скріплювальними сумішами

7.2.1. Кріплення, утворене нагнітанням суміші в масив

Принцип ін'єкції скріплювальних сумішей у гірський масив відомий з середини XIX ст. як спосіб доводісної цементації. У 1884 р. у Німеччині на шахті "Райн-Прайсен" вперше було застосовано нагнітання цементної суміші для підвищення носійної здатності кріплення гірничих виробок. Пізніше успішні спроби зміцнення порід були застосовані при будівництві тунелів у Німеччині та Франції. Широке застосування технології нагнітання спостерігалось після розробки способу випереджального зміцнення порід (1885–1896 рр.). Технологія кріплення порід синтетичними смолами вперше була впроваджена в колишньому СРСР (середина XX ст.).

Необхідною умовою застосування ін'єкційного зміцнення порід є наявність навколо виробки тріщинуватої зони. Вона може бути природною (тектонічні процеси) або створеною штучно. Серед найбільш перспективних конструкцій слід відзначити ті, що передбачають штучне створення зони тріщинуватості, використовуючи геомеханічні процеси розвитку зони руйнування порід або подрібнення гірського масиву камуфлетними вибухами.

Технологічні особливості конструкцій першого типу передбачають, що виробка закріплюється щитом-опалубкою 1 (рис. 7.23), який утворює зазор із породним контуром, дає можливість породам зміщуватися в процесі деформування та одночасно захищає виробку від їх обрушення. Щит складається із секцій (оболонки з листового заліза з ребрами жорсткості), у яких передбачені отвори для буріння свердловин розташування ін'єкторів. Для підвищення стійкості можуть застосовуватися анкери-ін'єктори 3, конструкція яких подана на рис. 7.24. Нагнітання скріплювального розчину у приконтурний масив проводять з відставанням від прохідницьких робіт на 20–30 діб для формування зони інтенсивного тріщинотворення. Тиск нагнітання до 1 МПа. Розчин розповсюджується по щілинах тарозшаруваннях, витікає в простір між породним контуром та щитом-опалубкою, заповнює його і створює несучу оболонку 2 (див. рис. 7.23). Після того, як розчин затвердіє, крайні секції щита демонтують і переміщують до вибою виробки (зазвичай монорейкою).

Кріплення «Моноліт» (рис. 7.25) передбачає попереднє розвантаження гірських порід від напружень за допомогою камуфлетних зарядів вибухових речовин, які підривають оточуючих виробок породах. Із зони тріщинуватих порід напруження переміщуються в глибину масиву. Утворена зона являє собою природну будівельну конструкцію на зразок кам'яної кладки з окремих криволінійних блоків, яку насичують скріплювальною сумішшю.

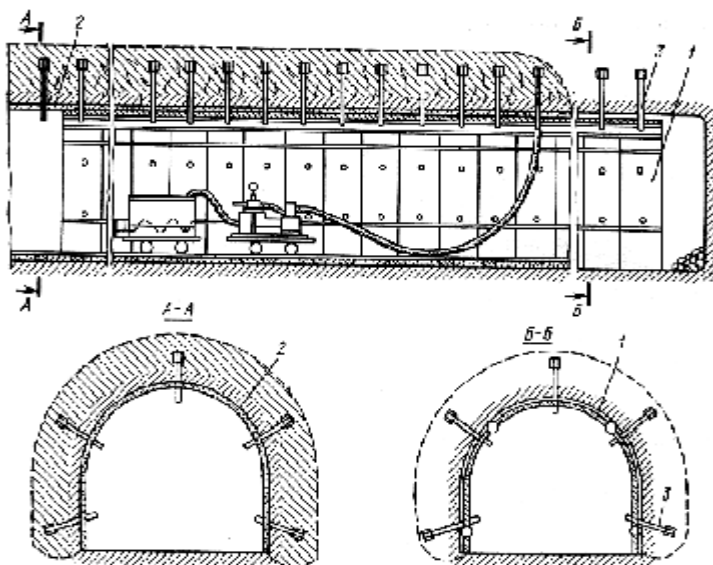


Рис. 7.23. Конструктивно-технологічна схема породобетонного кріплення

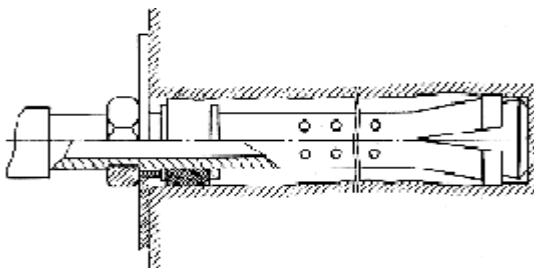


Рис. 7.24. Анкер-ін'єктор з щілинно-клиновим замком

Послідовність технологічних операцій зведення кріплення наступна. Гірничувиробкуспоруджують підзахистом кріплення-опалубки 1, у якій передбачені отвори для буріння шпурів 2. У шпурах розміщують камуфлетні заряди, підривання яких створює системи тріщин, але запобігає викиду порідувиробку. Зазор між кріпленням-опалубкою й початковим контуром виробки заповнюється після вибуху зміщеною розпушеною породою 4. Для зміцнення розвантажених порід 4 відновлюють (бурять) сверд-

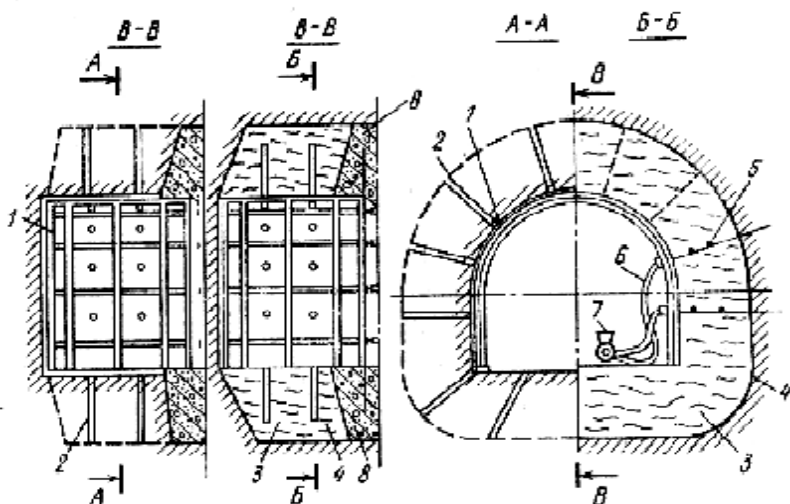


Рис. 7.25. Конструктивно-технологічна схема кріплення «Моноліт»

ловини, вставляють у них ін'єктори 5, поєднують їх гнучкими шлангами біз тампонажним насосом 7 та виконують нагнітання скріплювальних розчинів. Суміш проникає в тріщини навколо шпурів та заповнює їх, переміщуючись з глибини масиву до контуру виробки. Після твердіння розчину в масиві формується монолітна породна конструкція 8, товщина якої складає до 2,5–3 м. Важливим елементом технології є контроль якості прихованих робіт (розміри зони зміцнення, ступінь заповнення тріщин, міцність композиту).

Здебільшого при ін'єкціях застосовують цементні розчини, рідше – синтетичні смоли та інші полімерні матеріали. В останньому випадку (рис. 7.26) використовують окрему подачу двох хімічних компонентів (синтетичної смоли й затужавлювача), які змішуються в ін'єкторі, утворюючи скріплювальну суміш з високими міцнісними та проникливими властивостями.

Серед достоїнств породноносійних конструкцій слід виділити високу носійну здатність (до 5 МПа), економічність, використання принципу ресурсозбереження, що пов'язано із застосуванням природного будівельного матеріалу (породних блоків), який залягає безпосередньо на місці зведення кріплення. Серед недоліків – низькі темпи зміцнення породного масиву у порівнянні з темпами спорудження виробок, необхідність зведення й пересування кріплення-опалубки, недостатню укомплектованість шахтобудівників відповідним обладнанням (для контролю якості прихованих

робіт), обмежене застосування цієї технології в слабких, схильних до розмокання породах.

Породоносінні конструкції мають достатньо широку область можливого застосування: капітальні виробки, що споруджують в складних гірничо-геологічних умовах; виробки, в яких не припиняється конвергенція порід; ремонти підземних споруд, заміна кріплення тощо.



Рис. 7.26. Схема нагнітання хімічної суміші:

1, 2 – напірні рукави; 3 – трійник; 4 – змішувач; 5 – завантажувальна трубка; 6 – герметизатор; 7 – нагнітальна трубка; 8 – щілини; 9 – гірський масив

7.2.2. Поверхневий полімер-набризк

Значні перспективи мають способи забезпечення стійкості виробок, що передбачають напilenня (набризк) полімерних композицій на породний контур. Принцип зміцнення порід полімер-набризком оснований на зв'язуванні (“заклеюванні”) відслоненої поверхні масиву шляхом напilenня на неї кількох шарів скріплювального розчину та формування особливої еластичної оболонки (мембрани). Розроблені синтетичні композиції хапактеризуються значною адгезією до гірських порід, високою міцністю, властивістю швидкого твердіння.

Полімер-набризк застосовують для зміцнення тріщинуватих масивів, причому створена еластична оболонка забезпечує необхідний рівень остаточної міцності порід навколо виробки, ефективно протидіє напруженням розтягання на контурі.

Зазвичай товщина полімерного покриття за один цикл нанесення складає 0,3–0,5 мм. Для формування полімерної оболонки наносять до 10 шарів набризку. Спінювання та твердіння скріплювального розчину триває тільки 20 – 30 секунд, що запобігає стіканню композиції з породної поверхні. У залежності від здатності суміші спінюватися, товщина затверділої оболонки складає від 3–5 мм до кількох см.

Загальна схема полімер-набризку подана на рис. 7.27. Пристрій для набризку включає робочіємність для синтетичної смоли 5 та завантажувача 6, систему рукавів для повітря- та сумішоподавання 3 та 9, регулювальні крани 10, форсунку 13, в якій змішуються компоненти скріплюваль-

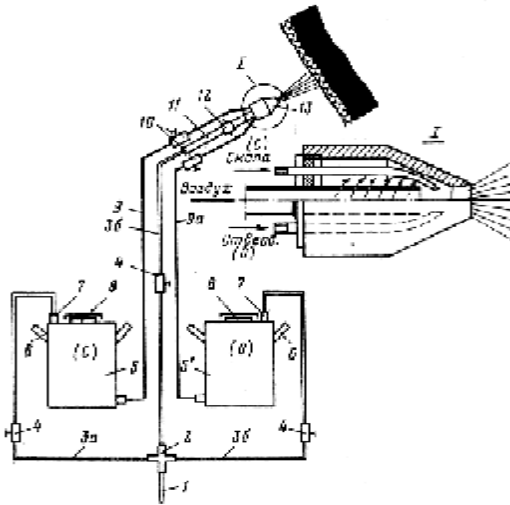


Рис. 7.27. Загальна схема полімер-набризку

ної суміші та достатньою швидкістю, факелом подаються на породне оголення. Відстань між форсункою та контуром виробки складає близько 150 мм.

Досвід застосування еластичних оболонок на шахтах Німеччини, Південно-Африканської Республіки та України свідчить про значні можливості поверхневого набризку для підвищення стійкості гірського масиву, за-

побігання вивалів порід покрівлі, протидії процесам вивітрювання та ін. Варто відзначити успішне впровадження цієї технології на особливо глибоких (2 – 3 км) золотодобувних шахтах ПАР, де полімер-набризк отримав широке застосування як в комбінації з анкерним кріпленням, так і самостійно.

Питання для самоконтролю:

1. Розкрийте основні уявлення про механізм роботи анкерного кріплення й умови його ефективного застосування.
2. Дайте характеристику замковим та беззамковим конструкціям анкерів.
3. У чому полягають особливості монтажу й роботи розпірних анкерів?
4. Дайте характеристику залізобетонним анкерам і способам їх закріплення.
5. Розкрийте конструктивні особливості сталеполімерних анкерів. У чому полягають їх переваги?
6. Як проводять монтаж сталеполімерного анкерного кріплення?
7. Опишіть стадії моніторингу анкерного кріплення.
8. Розкрийте технологічні особливості нагнітання скріплювальних сумішей у гірський масив навколо виробки.
9. Як і коли застосовують технологію полімер-набризку?

8. КОМБІНОВАНЕКРІПЛЕННЯ

Ідея комбінованого кріплення. Арка – набризк – тампонаж. Анкер – набризкбетон. Рама – анкер. Взаємодія конструкцій. Управління носійною здатністю кріплення.

8.1. Заздалегідь спроектованіконструкції

Комбінованим називають кріплення, що складається з кількох взаємодіючих конструкцій, які доповнюють одна одну. Основна ідея полягає в поєднанні властивостей підпірних конструкцій з використанням носійної здатності оточуючих порід шляхом створення сукупної системи “кріплення–

масив”. Збільшення носійної здатності породного масиву дає можливість знизити матеріаломісткість та вартість базових опорних конструкцій безшкоди для стану виробки. У складних (або змінних) гірничо-геологічних умовах спільна робота різних конструкцій може забезпечити стійкість виробки мінімальними економічними витратами.

Серед найбільш перспективних типів комбінованого кріплення відзначимо системи: арка–набризк–тампонаж; анкер–набризкбетон; рама–анкер. Їх проектують заздалегідь, а складові конструкції споруджують у виробці майже одночасно, що забезпечує заданий (незмінний) опір кріплення протягом строку служби виробки.

Кріплення АНТ (арка – набризк – тампонаж) передбачає зведення сталевих арок, монтаж плоскої залізобетонної затяжки, нанесення на внутрішню поверхню арок затяжок (з боку виробки) тонкого шару набризкбетону та тампонаж пісково-цементно-грозичину в простір між контуром виробки й зовнішньою поверхнею кріплення (рис. 8.1). У цьому випадку набризк запобігає витіканню тампонажного розчину у виробку, відіграє роль ізоляційної оболонки. В умовах відносно стійкого стану масиву спершу заповнюють закріпний простір у боках виробки (знизу – вгору), а потім порожнини впокрівлі. У слабких породах – навпаки. У залежності від площі поперечного перерізу вироб-

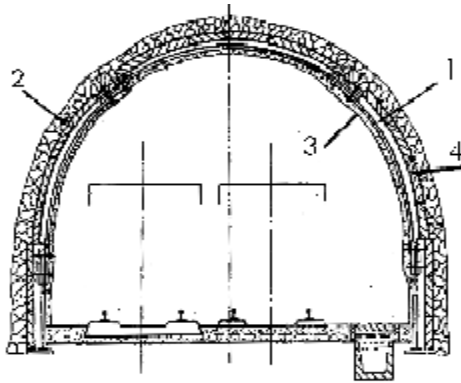


Рис. 8.1. Комбіноване кріплення АНТ:

1 – сталева арка; 2 – шар тампонажу; 3 – шар набризку; 4 – залізобетонна затяжка

ки та якості прохідницьких робіт потреба в тампонажному матеріалі складає $2,4 - 3 \text{ м}^3$ на 1 м виробки.

У результаті тампонажу навколо кріплення формується носійна оболонка, яка є складовим конструктивним елементом кріплення. Цементний розчин скріплює блоки породи на контурі, чим підвищує несучу здатність масиву. Рамне кріплення через тампонажну оболонку швидко входить у контактну взаємодію з породами, що мінімізує розвиток зони руйнування порід навколо виробки та вирівнює розподіл навантаження по контуру рам. Крім того, забезпечується гідроізоляція виробки. Серед недоліків комбінованої конструкції відзначимо різну жорсткість тампонажної оболонки

та по датливих арок, що не дозволяє повністю використати носійну здатність кожної конструкції. Загалом, кріплення АНТ успішно, у великих обсягах застосовується на шахтах Донбасу в умовах порід середньої та низької стійкості, поза зоною впливу очисних робіт.

Комбіноване кріплення із анкерів та набризкбетону широко застосовують у підземних спорудах різного призначення, у т. ч. у капітальних виробках рудників та вугільних шахт з гладкостінним контуром (комбайнове проведення виробок або використання контурного підривання). Основними носійними елементами кріплення (рис. 8.2) є анкери із сталевих стержнів періодичного профілю довжиною $1,5 - 2,5 \text{ м}$, закріплені по всій довжині шпурів за допомогою цементних або полімерних сумішей. По контуру виробки наноситься шар (або декілька шарів) набризкбетону. Конструктивні елементи виконують кожний свою роль: анкери утворюють зону армування порід, та сприймають навантаження, а набризкбетон скріплює породи розбиті тріщинами, перешкоджає руйнації масиву на контурі виробки. При цьому дія конструктивних елементів взаємопов'язана і забезпечує максимальне використання носійної здатності гірських порід.

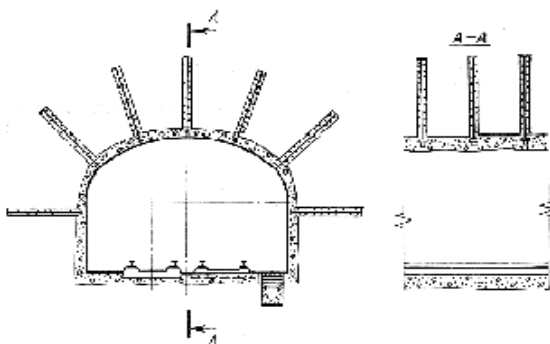


Рис. 8.2. Комбіноване кріплення із набризкбетону та анкерів

Для підвищення ефективності роботи цього комбінованого кріплення застосовують додаткові короткі бетонні анкери (до 20 см), які розташовують із щільністю 2-3 штуки на 1 м² поверхні й заповнюють бетоном у процесі набризку. Ефективне також використання у бетонній суміші сталевих волокон застосування міжшарами набризку дрітної сітки.

Заміна традиційних конструкцій монолітного бетонного та сталевих арок кріплення на комбінацію анкерів і набризк-бетону забезпечує значне (до 30%) скорочення вартості кріплення та підвищення стійкості виробок. Недоліками комбінованого кріплення є мала податливість, що скорочує область його застосування умовами порід середньої стійкості, а також економічна недоцільність у виробках з невеликою площею перерізу. *Комбіноване рамно-анкерне кріплення* передбачає поєднання анкерних конструкцій та сталевих рамних кріплення.

Застосовують два варіанти такої комбінації: розташування анкерів між рамами (рис. 8.3) та в площині рами з безпосередньою в'язкою елементів (рис. 8.4).

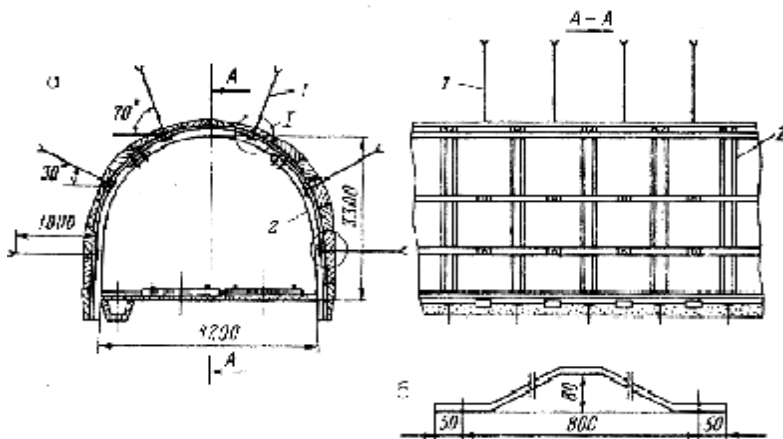


Рис. 8.3. Рамно-анкерне кріплення (Росія)

У першому випадку між рамами і покрівлю та боки виробки встановлюють анкери, які розташовують у площині, паралельній площині арок. Застосування особливих міжанкерних стяжок (рис. 8.3, б) повинно забезпечувати щільне притискання рами до контуру порід при натяганні анкерів (щоне завжди вдається з причини можливої невідповідності фактичного контуру виробки формі рами). Анкери створюють зону обтискання порід, що значно скорочує їх зміщення, а рами приймають вагу зруйнованих порід, що відокремилась від масиву.

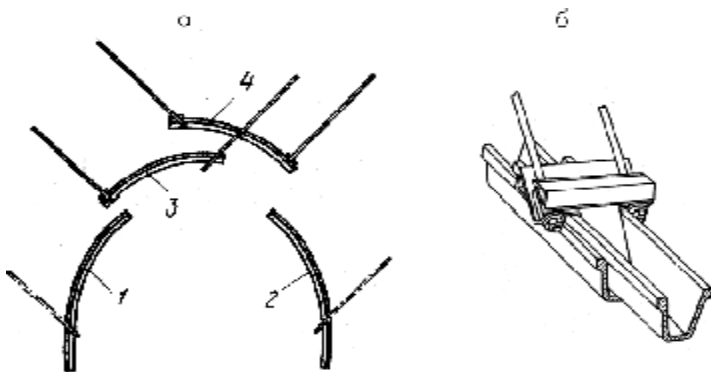


Рис. 8.4. Рамно-анкерне кріплення (Франція):

1, 2 – стояки; 3, 4 – елементи складеного верхняка; 5 – анкери

При безпосередньому закріпленні рами анкерами (рис. 8.4) всі конструктивні елементи розташовані в одній площині. Забезпечується пряма взаємодія несучих елементів арки з анкерами. Проте конструкція потребує подвоєної кількості анкерів, які інші подібні з'єднання (рис. 8.5).

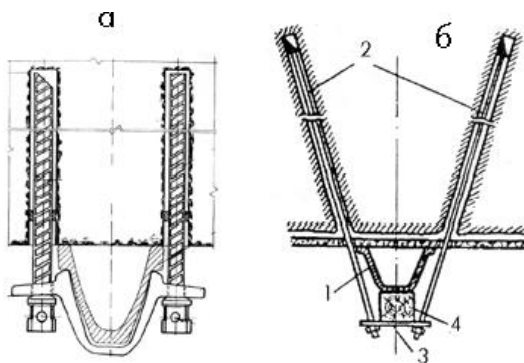


Рис. 8.5. Підсилення верхняка анкерними парами

Слід звернути увагу, що спільна робота анкерного та рамного кріплення не забезпечується, якщо між рамою й породним контуром залишається зазор, сумірний із граничною податливістю анкерів. Суттєвою проблемою на шляху застосування комбінованого рамно-анкерного кріплення виступає невідповідність режимів роботи базових конструкцій. Рамне кріплення податливою конструкцією, яка працює в режимі заданого навантаження. Беззамкові анкери мають жорсткий режим роботи (режим

заданих деформацій, які зазвичай не перебільшують 50 мм). Майже жорстка робота анкерів при недостатній їх кількості може призвести до передчасного руйнування стержнів, після чого на рами (носії)на здатність яких у комбінованому кріпленні також зменшена) почнуть діяти руїнівні навантаження. Ці причини привели до заборони рамно-анкерного кріплення у гірничій галузі Австралії та деяких інших країн. Тому в умовах значних зміщень порід окремі анкери можуть застосовуватись тільки як елемент додаткового зміцнення гірського масиву, підсилення рамного податливого кріплення, що суттєво підвищить надійність виробки. Для забезпечення ефективної взаємодії конструкцій треба використовувати особливі податливі анкери.

Серед перспективних напрямків підсилення аранного кріплення анкером слід відзначити застосування анкерної пари (див. рис. 8.5), яку розміщують у площині, нормальній до на шарування порід, де очікуються їх максимальні зміщення. Це значною мірою вирівнює навантаження на раму, підсилює найбільш небезпечну ділянку кріплення. Завдяки зминанню дерев'яної прокладки 4, між днищем профілю 1 та планкою 3, забезпечується додаткова податливість конструкції.

Ефективним напрямком підвищення несучої здатності рамного кріплення є застосування поздовжніх балок, які «підшивають» до покриття за допомогою анкерів (рис. 8.6).



Рис. 8.6. Підсилення рам поздовжніми балками з канатними анкерами

При спільному застосуванні анкерних і трапецієвидних рамних конструкцій слід обов'язково проводити силовий розпір елементів рами (див. рис. 6.29, 6.36), що забезпечує одночасне введення в роботу обох елементів комбінованого кріплення. Підсилення прямолинійних верхняків 1 доці-

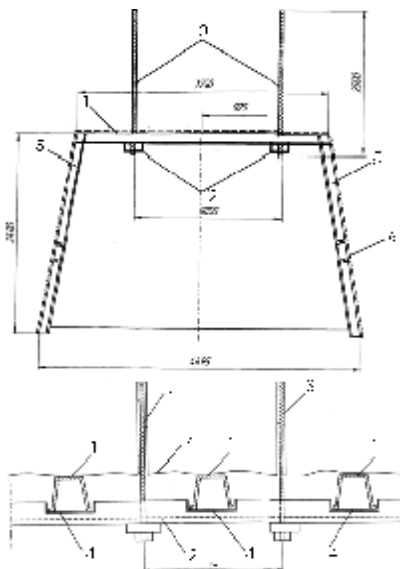


Рис. 8.7. Підсилення трапецієвидного кріплення швелерними балками з канатними анкерами

вість демонтувати один із стовбів рами для встановлення крайньої секції механізованого комплексу лави, що значно знижує трудомісткість його монтажу.

8.2. Кріплення регульованого опору

Концепція кріплення регульованого опору передбачає послідовну зміну (регулювання) несучої здатності кріплення в залежності від конкретної геомеханічної ситуації вздовж виробки шляхом підсилення початкової конструкції додатковими. Підставами такого підходу є недостатня надійність, часом невизначеність проектної інформації щодо умов спорудження виробки. Це приводить (особливо в виробках значної протяжності) до відмов кріплення на одних ділянках та завищеної матеріаломісткості на інших. Тому з метою оприлюднення відповідності несучої здатності кріплення проям гірського тиску, скорочення загальних витрат на будівництво підтримання виробок застосовують двостадійне проектування кріплення регульованого опору.

На першій стадії (до початку спорудження виробки) на основі ре-

льно проводити за допомогою поздовжніх швелерних балок 2, "підшитих" канатними анкерами 3 до покрівлі виробки (рис. 8.7).

Таке рішення дозволяє підсилити верхняк у найбільш небезпечних перерізах без захарашення виробки стовпами й перешкоджання транспортним процесам. Застосування канатних анкерів, кінцевої частини яких (0,5-1 м) вклеюється в шпурі полімерними сумішами, забезпечує несучу здатність до 280 кН та опадливість не менше 18% від довжини вантової частини каната, що гарантує сумісність режимів роботи рам і анкерів. Завдяки наявності в підсилюючих балках 2 спеціальних пазів 4, забезпечується фіксація рам у проектному положенні, вирівнюються зусилля в суміжних рамах. Анкерне підсилення дає можли-

зультатів інженерно-геологічних розвідувальних проектують базове кріплення з мінімально допустимою для виявлених умов носійною здатністю. Одночасно передбачають систему моніторингу за зміщеннями порід і станом кріплення, обирають варіанти підсилюючих конструкцій.

На другій стадії (будівництво виробки) зводять кріплення, встановлюють датчики зміщень порід, здійснюють моніторинг стану виробки. На ділянках, де зафіксовано сигнальні (критичні) показники зміщень порід, проводять підсилення кріплення додатковою конструкцією. Спостереження за станом виробки продовжують, у разі необхідності, проводять повторне підсилення кріплення. Серед варіантів додаткових конструкцій слід відзначити набризкбетон, анкерне кріплення, тямпонаж за кріпного простору, ін'єкцію в масив скріплювальних сумішей, сталеві рами тощо.

Своєчасне введення в дію додаткової конструкції кріплення, як правило, стабілізує геомеханічну ситуацію та забезпечує надійне підтримання виробки. При цьому, завдяки виявленню ділянок з небезпечними умовами, вдається застосовувати конструкції з підвищеною матеріаломісткістю за менших витрат, а решту виробки підтримувати полегшеним кріпленням. Цей спосіб відкриває нові можливості ресурсозбереження й гнучкого управління геобудівельними технологіями.

Уперше цей підхід було запропоновано у т.зв. *“Новому австрійському методі спорудження тунелів”* (1962 р.). Метод передбачав максимальне використання несучої здатності гірського масиву шляхом застосування набризкбетонного покриття відразу після оголення порід. Систематичними замірами зміщень породного контуру визначалися стан кріплення та потенційно небезпечні ділянки вздовж виробки, які підсилювали додатковими конструкціями. Результати контролю використовували для корекції паспорту кріплення при подальшому спорудженні виробки. При цьому виявляли взаємозв'язок між встановленням додаткових конструкцій кріплення та геомеханічними процесами в гірському масиві. Шляхом відповідної комбінації окремих конструкцій кріплення та необхідним часом їх введення в роботу досягали рівноваги системи “кріплення–масив” і припинення подальших деформацій порід. Основним типом підсилюючих конструкцій при спорудженні тунелів були додаткові шарини набризкбетону.

Кріплення регульованого опору знайшло використання не тільки при будівництві тунелів, але й у протяжних виробках вугільних шахт (поза впливом очисних робіт) і показало високу ефективність. Проте слід відзначити, що більшість підсилюючих конструкцій ефективно працює на ранніх стадіях проявів геомеханічних процесів, а їх застосування із запізненням може стати причиною прискореного розвитку зони руйнації порід, формування підвищених навантажень на кріплення та його відмов.

У зв'язку з цим, для виробок з високим ступенем функціональної відповідальності, в яких недоцільно допускати ремонти й транспортні простої, автором розроблений *спосіб підтримання виробок з резервуванням носійної здатності кріплення*. Метою резервування (тобто введення додаткової носійної здатності, більшої ніж мінімально необхідна для виконання

конструкцією своїх функцій) є запобігання відмов кріплення при можливому у відхиленні прогнозних факторів від фактичних значень. Згідно із розробленим способом, початково виробку кріплять з запасом міцності, що перебільшує рівень очікуваних навантажень на величину несучої здатності резервного кріплення. Після реалізації основних зміщень породного контуру, у разі виявлення на окремих ділянках виробки недовантаженого стану комбінованої конструкції, проводять її полегшення шляхом поетапного демонтажу резервного кріплення. Критеріями недовантаженого стану для арочного податливого кріплення є: зміщення елементів кріплення у вузлах податливості – до 50 мм, прогин верхньої катастояків – до 50 мм, кількість зламаних затяжок – не більше 5%, відношення допустимого та діючого вигинних моментів (упружній стадії роботи) більше 1,3.

Переваги цього способу, який за своєю суттю є також кріпленням регульованого опору, але із зворотною дією, полягають у значному зменшенні ризику втрати стійкості виробки при управлінні носійною здатністю кріплення та в приведенні його у відповідність до проявів гірського тиску, що дозволяє оптимізувати матеріаломісткість комбінованих конструкцій у залежності від розподілу навантаження по довжині виробки.

Питання для самоконтролю:

1. У чому полягають основні переваги комбінованого кріплення?
2. Як споруджують кріплення АНТ (арка – набризк – тампонаж)?
3. Як працює комбіноване кріплення із анкерів та набризк бетону?
4. Як забезпечують взаємодію між анкерів при застосуванні рамно-анкерного кріплення?
5. Розкрийте концепцію кріплення регульованого опору.
6. У чому полягають особливості “Нового австрійського методу спорудження тунелів”?
7. Розкрийте суть способу підтримання виробок з резервуванням носійної здатності кріплення.

9. МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ КРІПЛЕННЯ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

Проектування на основі прототипів, аналогів, імовірісно-статистичних моделей, аналітико-експериментальних залежностей. Двостадійне й системне проектування. Режими взаємодії кріплення з масивом. Розрахункові схеми з активним навантаженням та з урахуванням реактивного опору порід.

9.1. Огляд методів

Основною технічною вимогою до кріплення є забезпечення надійності гірничих виробок при мінімальних витратах матеріалів. Надійність підземних споруд залежить від спільного впливу багатьох факторів, які складним чином взаємодіють між собою: міцнісні й деформаційні властивості породного масиву, його неоднорідність, технологічні особливості проведення виробки, конструкція та деформаційно-силова характеристика кріплення, характер його контактної взаємодії з масивом, вплив інших виробок тощо. Отримати аналітичне рішення задачі прогнозування стану таких складних систем методами механіки підземних споруд достатньо важко, особливо в умовах обмеженої інформації щодо властивостей оточуючих порід. Тому більшість методів проектування кріплення мають експериментальну основу й ґрунтуються на практичному досвіді підтримання виробок у тих чи інших умовах.

Першим, започаткованим ще в стародавні часи й не втраченим свого значення сьогодні, є *метод проектування на основі прототипів*. Суть його полягає в накопиченні знання про роботу технічного об'єкту (прототипу) в характерних умовах і поширенні позитивного досвіду використання аналогічних об'єктів для подібних умов. Протягом століть емпіричні спостереження за станом різноманітних конструкцій кріплення підземних споруд накопичувалися окремими рудознавцями, давніми гірничими осередками й середньовічними цехами, вченими та навчальними закладами. Це дозволяло на кожному історичному етапі здійснювати вибір параметрів кріплення за накопиченим досвідом шляхом відтворення подібності до попередніх перевірених рішень.

У другій половині XX ст. методи проектування на базі прототипів знайшли своє відображення в практиці застосування *типових проектів*. Вони увібрали в себе узагальнений досвід спорудження й підтримання великої кількості виробок у різноманітних умовах та слугували достатньо надійним обґрунтуванням параметрів кріплення на малих глибинах розробки. Збірники типових перерізів гірничих виробок спрощували процес проектування до вибору готового паспорта кріплення лише по типу виоро-

бки, глибині її закладання, площі перерізу й міцності вміщуючих порід. Слід зазначити, що типове проектування перешкоджало широкому впровадженню нових типів і матеріалів підземних конструкцій, оскільки перше ніж стати типовими, вони повинні були пройти тривалий шлях масового виробництва й багаторічної апробації. Крім того, перехід на значні глибини розробки, які характеризуються принципово відмінним механізмом проявів гірського тиску, призвів до суттєвих проектних помилок і поступовий відмови від спрощених типових проектів.

Кроком передупідвищенні ефективності проектних рішень на базі використання досвіду експлуатації підземних споруд став *метод проектування кріплення за аналогами*, розроблений на базі теорії статистичної подібності. Його характерною ознакою стало наукове порівняння гірничо-геологічних умов нового проектного рішення з умовами успішного застосування аналога та проведення відповідного корегування параметрів кріплення. Етапи такого проектування включають:

- аналіз гірничо-геологічних умов у місці закладання проектної споруди та визначення фізико-механічних властивостей гірського масиву;
- підбір споруд-аналогів та даних про властивості порід, де було розташовано прототип;
- виділення конструктивних елементів, які підлягають розрахунку;
- визначення для аналогів та проектного кріплення розрахункових навантажень (зміщень контуру) за характерними для цих умов експериментально-аналітичними залежностями;
- визначення параметрів кріплення, які забезпечують рівність критеріїв подібності стану аналога та проектного кріплення.

Серед недоліків способу слід відзначити недостатню обґрунтованість методики переходу від аналога до нової споруди при відхиленні умов підтримання виробки, а також проблему урахування можливої зміни гірничо-геологічних умов.

Підвищити надійність аналогових проектних рішень можливо шляхом використання *ймовірнісно-статистичних моделей гірничих виробок*, які дозволяють кількісно оцінювати неоднорідність гірського масиву та можливе відхилення діючих навантажень від прогнозних значень. Узв'язку з цим у сучасному проектуванні підземних споруд усе більшу увагу приділяють врахуванню впливів випадкових факторів та ймовірнісним описам об'єктів.

Слід відзначити, що породне середовище, яке вміщує виробку, суттєво неоднорідне в просторі, нерівномірно обводнене, вміщує системи тріщин та інші послаблюючі дефекти, розподіл та зміни яких важко врахувати при традиційному проектуванні. Якщо прийняти основним фактором стану виробки співвідношення несучої здатності кріплення та діючого наван-

таження, то знайдуться ділянки, де це співвідношення буде більше одиниці (стійкий стан виробки) та навпаки. Довжина зруйнованих ділянок та відстань між ними – величини випадкові, хоча вони корелюють між собою. Опис цього складного процесу можливий при умові різно-статистично-мупідході, який дозволяє за допомогою теорії випадкових функцій оцінити стійкість гірничих виробок, доцільну матеріаломісткість кріплення, частоту циклів ремонтних робіт та витрати на економічно доцільне проектування. Не дивлячись на складність та значну трудомісткість збирання необхідної статистичної вибірки для побудови випадкових функцій, цей підхід залишається одним з найбільш ефективних для отримання достовірної кількості інформації на стадії проектування.

Найбільше поширення в країнах колишнього СРСР отримало *проекткування за аналітико-експериментальними залежностями*, які були покладені в “Будівельні норми і правила” (БНіП) та регіональні методи кріплення. Основний нормативний документ (БНіП: “Підземні гірничі виробки”) визначає розрахункове навантаження на кріплення виходячи з величини типового зміщення оточуючих виробку порід. Його отримують з нормативних графіків залежності від глибини закладання виробки розрахованої міцності порід масиву на тискання (міцність зразків з урахуванням коефіцієнта структурного послаблення масиву). Деякі впливові фактори (кут залягання порід, напрямок їх зміщень, ширина виробки, вплив інших виробок, строк служби кріплення) враховують за допомогою корегуючих коефіцієнтів, які мають підпорядковане значення. Тип кріплення вибирають за очікуваною величиною зміщень порід, а його параметри за отриманим навантаженням, яке приймають з урахуванням конструктивної податливості кріплення та коефіцієнтів перевантаження, призначення та умов проведення виробки.

Основні положення нормативних документів у цілому увібрали в себе багаторічний досвід будівництва й підтримання гірничих виробок, відповідають науковим уявленням про закономірності проявів гірського тиску, прості та зручні в практичному використанні. У той самий час слід звернути увагу на наявність помилок проектних рішень за методикою БНіП, які в одних випадках призводять до значних об’ємів перекріплення (щорічно близько 10% від загальної протяжності виробок), а в інших – до нерационально високого запасу міцності конструкцій.

Така ситуація пояснюється в першу чергу недостатньо достовірними відомостями про міцнісні властивості вміщуючих порід. Як правило, вони визначаються на стадії розвідки родовища за результатами випробувань кернів із розвідувальних свердловин. Останні пробурюють на відносно великій відстані одна від одної, як не завжди дозволяє відслідковувати змінність властивостей гірського масиву між свердловинами. Сама особливість

технологія відбирання та випробування зразків керну не забезпечує повною мірою інформацію про стан порід у масиві (“*insitu*”). Використання для уточнення ситуації коефіцієнта структурного послаблення, який обирається в залежності від відстані між площинами послаблення порід, здійснюється не завжди коректно, оскільки встановити його фактичне значення до початку будівництва виробки неможливо.

Крім того, за величиною зміщення порід важають критичним навантаження накріплення в умовах залягання в покрівлі слабких або шаруватих порід різної міцності й контактної зчепності, оскільки такі породи можуть небезпечно обвалюватися накріплення при зміщеннях лише 40–50 мм. БНІП недостатньо враховує регіональні особливості гірничо-будівельних робіт, дає обмежені рекомендації щодо вибору типу кріплення, не обчислює розподілу навантаження по периметру виробки.

Для підвищення ефективності проектних рішень у добувних районах використовують інженерні методи прогнозу проявів гірського тиску у вигляді експериментально-аналітичних залежностей величини навантаження на кріплення (або зміщення порід) від основних впливових факторів. Геомеханіка суцільного підходу відображає змінність проявів гірського тиску в залежності від регіонально-го метаморфізму вміщуючих порід, що значно впливає на величину й розподіл навантаження по контуру виробки. Такий підхід покладено в основу окремих програм автоматизованого проектування кріплення, він увійшов у деякі нормативні документи, але потребує збирання додаткової проектно-ї інформації й достатньо складних розрахункових операцій.

Поряд з традиційними методами вибору параметрів кріплення все частіше застосовують *двостадійне проектування*, яке передбачає обов’язкове уточнення й корегування проектних рішень під час спорудження виробки (див. підрозділ 8.2). Цікаво, що дослідження давніх гірничих споруд свідчать про вибір кріплення саме під час їх будівництва: кріпилися тільки небезпечні ділянки виробок, застосовувалися різні конструкції й параметри кріплення відповідно до проявів гірського тиску. Нажаль, критерієм визначення небезпечних ділянок у ті часи слугували здебільшого численні випадки травматизму робітників, що неприпустимо сьогодні. Примітно, що вже в кінці XIX ст. один з поширених способів вибору параметрів кріплення передбачав створення на початковому етапі будівництва виробки дослідної ділянки, яку кріпили дерев’яними рамами різної носійної здатності та, виходячи зі стану рамп під навантаженням, обирали найбільш економічний варіант для всієї виробки. Спосіб передбачав затримку будівництва основної частини виробки до виявлення проявів гірського тиску, що не завжди прийнятно.

Як свідчить досвід останніх років, значне скорочення витрат на кріп-

лення та підтримання виробок може бути досягнуто шляхом *проведення проектних пошуків у безпосередній близькості до майбутньої виробки* (місце її закладання, прилеглі та найближчі виробки). Проектування кріплення в цьому випадку базується на фактичних показниках, максимально наближених до умов спорудження виробки. При цьому застосовують буріння дослідних свердловин упокрівлю з отриманням кернових стовпів довжиною 6–8 м, аналізують число відокремлених частин керну (по середкованому характеру кріплення), а зразки порід випробують на стиснення, розтягання й розмокання.

Іноді використовують оцінку стійкості порід за допомогою критерія стійкості порід Ріу (RQD), який дорівнює процентному співвідношенню сумарної довжини зразків керну, що перебільшують розмір двох його діаметрів, до загальної довжини кернового стовпа наділянці свердловини (табл. 9.1).

Таблиця 9.1. Параметри показника RQD (rock quality designation)

Показник RQD, %	Характеристика порід
90 – 100	Вельми стійкі
75 – 90	Стійкі
50 – 75	Достатньо стійкі
25 – 50	Слабкі
0 – 25	Вельми слабкі

Поруч з лабораторними випробуваннями проводять дослідження міцності порід масиву дослідних свердловин за допомогою пенетрометра, а також ендоскопію оточуючих порід відеокамерою інфрачервоного спектру (див. підрозділ 7.1.4). Можливості застосування сучасного приладового забезпечення отримання достовірної проектно-інформації в натурних умовах спорудження виробки сприяють розвитку індивідуального проектування кріплення, підвищують надійність проектних рішень.

Останнім часом у різних галузях виробництва знаходять застосування принципи *системного проектування об'єктів*, які починають використовувати також у гірничо-будівельній діяльності. Системне проектування кріплення передбачає раціональний вибір конструкцій та їх параметрів шляхом проведення функціонально-вартісного аналізу й т.зв. “функціонального конструювання” елементів кріплення. На відміну від предметного підходу, тут зосереджують увагу не на вдосконаленні конкретних конструкцій, а на забезпеченні функцій розглянутої системи, оцінці вартості виконання функцій та зв'язках підсистем. При цьому змінюється характер і напрям пошуку ефективних проектних рішень у бік розширення функціональних можливостей системи та її елементів.

Огляд сучасних методів проектування вказує на виняткову складність прогнозування навантаження на кріплення та вибору його раціональних параметрів. Не дивлячись на численність методів проектування, більшість яких ґрунтується на емпіричній основі, не вдається минути високого економічного ризику прийняття рішень. Першорядне значення дістає надійність системи при можливих відхиленнях від прогнозованих умов експлуатації. У цьому випадку перевага буде за конструкціями, які в стані адаптуватися до змін проявів гірського тиску. Для таких типів кріплення помилка в прогнозі менш небезпечна, хоча основний шлях ресурсозбереження полягає саме в підвищенні достовірності прогнозу геomechanічної ситуації.

9.2. Аналіз принципів та схем розрахунку кріплення

Важливою особливістю проектування конструкцій підземних споруд є розрахунок за двома класами граничних станів (подібно до розрахунків будівельних конструкцій у наземному будівництві). Перший визначається міцністю й стійкістю конструкцій, другий – розвитком надмірних зміщень, які перешкоджають нормальній експлуатації виробки.

Перший граничний стан визначається залежністю:

$$N \leq P, \quad (9.1)$$

де N – найбільше зусилля в конструкції від дії розрахункового навантаження;

P – носійна здатність конструкції як функція геометричних розмірів перерізу й розрахункового опору матеріалу.

Другий граничний стан характеризується залежністю:

$$U_{\max} \leq [U], \quad (9.2)$$

де U_{\max} та $[U]$ – відповідно максимальне й допустиме зміщення контуру кріплення.

Таким чином повинні забезпечуватися економічність та функціональна надійність гірничих виробок. Проте, на відміну від будівельних конструкцій наземних споруд, величина та розподіл навантаження на гірничі кріплення не можуть бути визначені точно, оскільки проектна інформація, як правило, недостатньо достовірна й лише наближається до фактичної картини розвитку механічних процесів у порушеному гірському масиві. У зв'язку з цим методи розрахунку кріплення базуються на гіпотетичних, значною мірою ідеалізованих розрахункових схемах, що відображають характерні режими взаємодії кріплення з масивом.

Виділяють три основні режими такої взаємодії:

– режим заданого навантаження (вивалоутворення), коли величина навантаження не залежить від деформаційних характеристик кріплення;

– режим спільного деформування кріплення й оточуючого породного масиву (взаємовпливових деформацій), коли величина навантаження залежить від деформаційних характеристик кріплення;

– режим заданих деформацій, коли величина зміщення не залежить від деформаційних характеристик кріплення.

Другий та третій режим найбільш характерні для пластичних порід або для умов крихких порід при достатньо високій жорсткості кріплення. Навантаження проявляються в цих випадках у вигляді напружень на контакті кріплення з масивом. Для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій використовують відомі методи механіки твердого деформованого тіла (теорії пружності, пластичності та повзучості). З використанням цього підходу розроблені математичні моделі, що описують взаємодію з гірським масивом бетонних опор тунелів, стволів, а також бетонного, набризкбетонного та анкерного кріплення горизонтальних та похилих виробок шахт. Рішення практичних задач по розрахунку кріплення таким методом ускладнюється важкістю врахування різних механічних станів масиву й впливом технології прохідницьких робіт.

Найбільш розповсюдженим при застосуванні податливих конструкцій кріплення є режим заданого навантаження, який відображує процеси вивалоутворення порід з формуванням упокрівлі склепінь різних розмірів та конфігурацій. Основні гіпотези, що пояснюють механізм цього явища, полягають у наступному: вивалоутворення вважають результатом дії сили тяжіння порід в об'ємі склепіння обрушення; формування склепіння здійснюється від розтягуючих напружень або в умовах пружного стиснутого контуру; склепіння є результатом формування навколо виробки зони непружних деформацій; склепіння виникає як результат перерозподілу напружень при зміні форми (кривизни) контуру та інші. При цьому різні гіпотези окреслюють форму склепіння як півколо, параболу, напівеліпс; але на практиці склепіння має, неправильну форму, а його основа не завжди співпадає з шириною виробки.

Реалізація механічних процесів у вигляді склепіння обрушення зумовлює режим заданого навантаження (яке визначається розмірами склепіння), а оцінка напружено-деформованого стану кріплення проводиться методами будівельної механіки (метод стержневих систем та інші). На першому етапі розвитку теорії розрахунку кріплення (початок ХХ ст.) його деформації не аналізувалися, а активне навантаження, не дивлячись на відомі теорії вивалоутворення, приймалося рівнорозподіленим по периметру кріплення або подовжині верхняка (утрапеції в ідних храмах). У 1909 р. Ф. Фарбер вперше ввів розрахункову схему кільцевого кріплення, що враховувала нерівномірність навантаження, а також запропонував коефіцієнт нерівномірності навантажень, який суттєво впливав на носійну здатність кріплення.

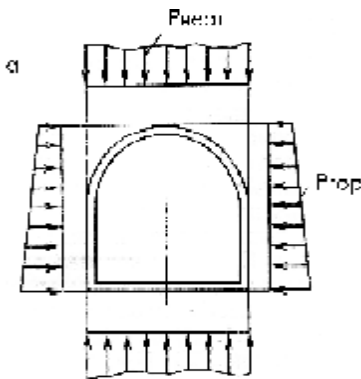
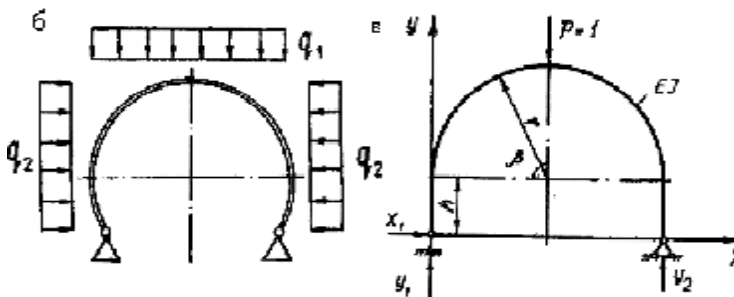


Рис. 9.1. Схеми без урахування сил бокового опору порід



У подальшому для горизонтальних і похилих виробок широко застосовували трималасхему без урахування бокового опору порід, що наведена на рис. 9.1, а. Вертикальній горизонтальній розрахунковій навантаженню кріплення задані тут вигляді пор прямокутної трапеції відного обрису, які зрівноважуються тільки внутрішніми зусиллями, що виникають при деформуванні конструкції. Для арочного кріплення використовують базову схему з рівно розподіленим навантаженням у боках і покрівлі (рис. 9.1, б) та (в деяких країнах, зокрема в Німеччині) схему, що відображає небезпечний випадок зосередженого навантаження у вершині склепіння (рис. 9.1, в). З причин простоти ведення розрахунків подібні схеми знайшли застосування в нормативних методах розрахунку кріплення більшості країн.

Слід відзначити деякі суттєві недоліки спрощених розрахункових схем. Згідно з ними, кріплення не впливає на величину і розподіл діючих навантажень, що не відповідає фактичному механізму роботи конструкцій і веде до проектних помилок. Схеми не враховують кут залягання порід і можливість похилої епюри навантажень. Прийнятий рівномірний розподіл навантажень дуже рідко зустрічається в гірничо-будівельній практиці, тому їх імовірна концентрація може призвести до неочікуваного збільшення вигинних моментів, небезпечних деформацій і відмов кріплення. Зіншого

боку, у разі правильного прогнозу величини й рівномірного розподілу навантаження, конструкція буде мати завищений запас міцності, оскільки в схемах не враховується контактна взаємодія стояків кріплення з породним масивом (реактивний опір). Розрахунок за схемою із зосередженим навантаженням (див. рис. 9.1, в) веде, як правило, до невиправданого збільшення матеріаломісткості кріплення (його носійна здатність виявляється у цьому випадку приблизно в 2,5 рази меншою, ніж у тієї ж самої конструкції за схемою з рівномірним розподілом навантаженням).

Значним кроком у розвитку методів розрахунку кріплення стало обчислення реактивного тиску порід, що виникає по боковим площинам контуру внаслідок вигину (під дією вертикальних навантажень) й контактної взаємодії з масивом бокових елементів кріплення (стояків). При цьому навантаження почали поділяти на активні (від тиску зруйнованих порід) та реактивні, що виникають від опору порід деформаціям кріплення в бік масиву. У 1936 р. було розроблено відомий метод Метропроекту (Б.П. Бодров, Б.Ф. Матері), згідно з яким (рис. 9.2, а) кільце кріплення замінювали шарнірним ланцюгом, а зв'язок кріплення та порід моделювали пружними радіальними опорами у всіх вершинах багатокутника, окрім верхніх, де кріплення під дією вертикального навантаження вигинається вниз (зона відлипання).

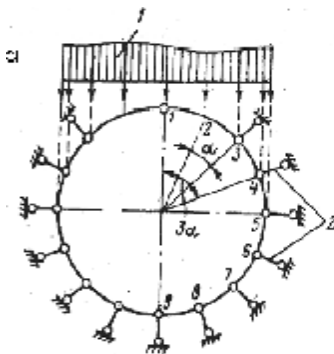
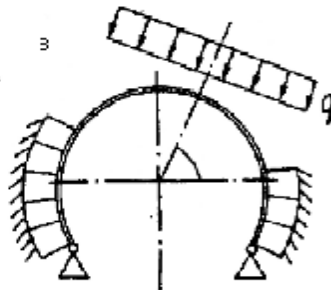
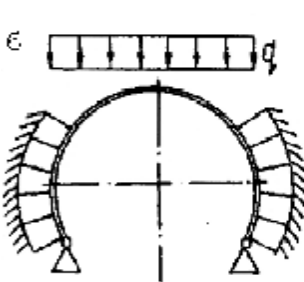


Рис. 9.2. Схеми з урахуванням сил бокового опору порід:

1 – активне навантаження;
2 – реактивний опір порід



Активне навантаження приймає вигляд зосереджених сил, прикладених у вершинах шарнірного багатокутника (верхня половина кільця). Реакція порід була прикладена у вузлах вигляду радіально спрямованих зосереджених сил, які визначаються залежністю:

$$R_n = K \Delta_n S \quad (9.3)$$

де R_n – реакція породи у вершині багатокутника;

K – коефіцієнт постелі порід Вінклера;

Δ_n – зміщення точки n в бік масиву;

S – площа поверхні ділянки кріплення, що припадає до даної вершини багатокутника.

Складність точного визначення коефіцієнта постелі, розмірів “зони відлипання”, а головне, велика трудомісткість розрахунку стримували широке застосування методу. Лише з появою комп’ютерної техніки й ефективних математичних моделей (числові методи скінчених елементів, початкових параметрів тощо) у нормативних проектних документах почали з’являтися розрахункові схеми (рис. 9.2, б, в), що зважають на вплив реактивного опору бокових порід. У них вдається враховувати напрямки основних зміщень порід, характеристики забутівки закріпного простору, точну геометрію кріплення тайогоспецпрофілю. Доволі перспективною для розрахунків арочного кріплення є схема (див. рис. 6.31), в якій розподіл активного навантаження підпорядкований параболічному закону й пов’язаний нормаллю до нашарування порід, а в боках виробки враховується реактивний опір, що дозволяє аналізувати різні варіанти навантаження.

Загалом, нові розрахункові схеми, що описують режим заданого навантаження (вивалоутворення), значною мірою наближені до фактичних умов роботи кріплення й можуть забезпечувати (вразі достовірної проектної інформації) надійні результати обчислень. Таким чином, для розв’язання широкого кола проектних завдань може успішно застосовуватися метод розрахунку, що оперує активними й реактивними навантаженнями. Напрямки його оптимізації складаються з урахування відповідної нерівномірності й асиметрії навантаження, уточнення впливу деформаційно-силової характеристики кріплення й шару забутівки на величину й характер розподілу навантажень, оцінки просторової роботи конструкції.

Проектування й розрахунок кріплення повинні стати найбільш творчим процесом гірничої інженерної діяльності, оскільки потребують використання великої кількості науково-технічних знань у відповідності до різноманітності гірничо-геологічних умов і геомеханічних ситуацій. Найбільшу перспективу отримують способи проектування, що передбачають оцінку геомеханічних параметрів порід у безпосередніх умовах спорудження виробки, що ставить принципово нові завдання проектних пошуків із застосування

дослідного обладнання. Типова практика повсюдного безваріантного “вибору” сталевих арок кріплення із спрощеним визначенням конструктивних параметрів відходить у минуле. Майбутнє – за інтелектом Гірничого Інженера, оскільки частка інтелекту у виробленому продукті порівняннiз часткою енергії та матеріалу, постійно збільшується...

Питання для самоконтролю:

- 1. Чому більшість методів проектування кріплення має експериментальну (досвідну) основу?*
- 2. У чому полягає метод проектування шахтного кріплення за аналогами?*
- 3. Чим зумовлене застосування ймовірно-статистичних моделей гірничих виробок?*
- 4. Опишіть методику проектування, покладену в “Будівельні норми і правила”.*
- 5. Розкрийте особливості двостадійного проектування і проведення проектних пошуків у безпосередній близькості до майбутньої виробки.*
- 6. Чим визначаються класи граничних станів при розрахунку кріплення?*
- 7. Які режими взаємодії кріплення з масивом застосовують у розрахункових схемах?*
- 8. Порівняйте розрахункові схеми з активним навантаженням по контуру кріплення зі схемами, що враховують реактивний опір бокових порід.*

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

ОСНОВНА

1. Гайко Г.І. Конструкції кріплення підземних споруд: Навч. пос. – Алчевськ: ДонДТУ, 2006. – 133 с.
2. Картозия Б.А. и др. Шахтное и подземное строительство. В 2 т. – М.: Издательство Академии горных наук, 2001.
3. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1992. – 543 с.
4. Максимов А.П. Горное давление и крепь выработок. Учеб. пособие. – М.: Недра, 1973. – 288 с.
5. Заславский Ю.З., Мостков В.М. Крепление подземных сооружений. – М.: Недра, 1979. – 325 с.
6. Каретников В.Н., Клейменов В.Б., Нуждихин А.Г. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник. – М.: Недра, 1989. – 571 с.

ДОДАТКОВА

До розділів 1 – 3

7. Агрікола Г. Про гірничу справу XII книг (книги I – VI)/ Переклад і редакція В.С. Білецького, Г.І. Гайка. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2014. – 232 с.
8. Лысков Б.А., Каплухин А.А. Использование подземного пространства. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 348 с.
9. Литвинский Г.Г. Конспект лекций и методические указания к изучению курса «Механика подземных сооружений». Модуль 4. Взаимодействие крепи с массивом горных пород. – Алчевск: ДГМИ, 1992. – 40 с.
10. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Часть II. Рудничное крепление. – М. – Л.: ГНТ Горное издательство, 1933. – 216 с.

До розділів 4 – 5

11. Косков И.Г. Новые материалы и конструкции крепи горных выработок. – М.: Недра, 1987. – 196 с.
12. Бетонные растворы для подземного шахтного строительства: Справочное пособие/ О.С. Докукин, И.Г. Косков, В.П. Друцко, С.А. Бернштейн. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
13. Цай Т.Н. и др. Сборные железобетонные крепи в горизонтальных горных выработках. – М.: Недра, 1971. – 120 с.
14. Стрельцов Е.В., Казакевич Э.В., Пономаренко Д.И. Крепление горных выработок угольных шахт набрызгом бетоном. – М.: Недра, 1978. – 237 с.

До розділу 6

15. Гайко Г.И. Научное обоснование ресурсосберегающих способов управления напряженным состоянием стальных рамных крепей горных выработок: Дис. . . д-р техн. наук: 05.15.04. – Алчевск, 2004. – 384 с.

16. Литвинский Г.Г., Гайко Г.И., Кулдыркаев Н.И. Стальные рамные крепи горных выработок. – К.: Техніка, 1999. – 216 с.

17. Литвинский Г.Г., Гайко Г.И., Малеев Н.В., Волошин В.Б. Межрамные ограждения шахтной крепи. – Алчевск: ДГМИ, 2000. – 110 с.

15. Шпрут Ф. Металлическая крепь подготовительных выработок. – М.: Госгортехиздат, 1958. – 233 с.

До розділу 7

16. Мельников Н.И. Анкерная крепь. – М.: Недра, 1980. – 252 с.

17. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. – Днепропетровск: Вільпо, 2002. – 372 с.

18. Васильев В.В., Левченко В.И. Технология физико-химического упрочнения горных пород. – М.: Недра, 1991. – 267 с.

До розділів 8 – 9

19. Заславский Ю.З., Дружко Е.Б. Новые виды крепи горных выработок. – М.: Недра, 1989. – 256 с.

20. Огородников Ю.Н. Проектирование и расчёт крепи подземных сооружений. Учеб. пособие. – Л.: ЛГИ, 1989. – 92 с.

21. Булычёв Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. Проектирование и расчёт крепи капитальных выработок. – М.: Недра, 1986. – 288 с.

22. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Сдвижкова Е.А. Геомеханика. Учебник для вузов. – К.: Новый друк, 2016. – 528 с.

23. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки. – М.: Стройиздат, 1982. – 31 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ТИПИ КОНСТРУКЦІЙ КРІПЛЕННЯ ТА ЇХ ГЕОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ	5
1.1. Сучасні підземні породи	5
1.2. Гірничі кріплення (оправа). Загальні відомості	9
1.3. Геомеханічні параметри та режими роботи кріплення	13
Питання для самоконтролю	17
2. ДЕРЕВ'ЯНІ КОНСТРУКЦІЇ	18
2.1. Історичний експеримент	18
2.2. Дерево як кріпильний матеріал	23
2.3. Базові конструкції кріплення	24
Питання для самоконтролю	26
3. КАМ'ЯНІ (МУРОВАНІ) КОНСТРУКЦІЇ	27
3.1. Природні та штучні камені	27
3.2. Типи кам'яного кріплення	28
Питання для самоконтролю	31
4. БЕТОННІ ОПРАВИ	32
4.1. Конструкції з монолітного бетону	32
4.1.1. Історична довідка	32
4.1.2. Бетон як будівельний матеріал	32
4.1.3. Бетонне кріплення в гірничих виробках шахт і рудників	33
4.1.4. Бетонні оправи великих поперечних перерізів	38
4.2. Наблизь бетонне кріплення	41
Питання для самоконтролю	44
5. ЗАЛІЗОБЕТОННЕ КРІПЛЕННЯ	45
5.1. Монолітний залізобетон	45
5.2. Збірний залізобетон	47
5.2.1. Рамні конструкції	47
5.2.2. Суцільні конструкції з панелей і обтічників	49
Питання для самоконтролю	53
6. СТАЛЕВЕ РАМНЕ КРІПЛЕННЯ	54
6.1. Історична довідка	54
6.2. Загальні конструктивні ознаки й елементи кріплення	57
6.2.1. Несійні елементи та їх профілі	57
6.2.2. Вузли податливості	60
6.2.3. Міжрамні оголози	63
6.2.4. Стяжки, клини, забутівка	69

6.3. Основні типи сталевих хвостків	72
6.4. Основні напрямки конструктивного вдосконалення сталевих хвостків	76
Питання для самоконтролю	84
7. ПОРОДОНОСІВНІ КОНСТРУКЦІЇ КРІПЛЕННЯ	85
7.1. Анкерне кріплення	85
7.1.1. Основні уявлення про механізм роботи анкерного кріплення	85
7.1.2. Типи та конструктивні елементи анкерного кріплення	88
7.1.3. Технологія монтажу сталевих полімерних анкерів	96
7.1.4. Моніторинг анкерного кріплення	101
7.2. Зміцнення породних конструкцій скріплювальними сумішми	106
7.2.1. Кріплення, утворене нагнітанням сумішів масив	106
7.2.2. Поверхневий полімер-набризка	109
Питання для самоконтролю	110
8. КОМБІНОВАНЕ КРІПЛЕННЯ	111
8.1. Заздалегідь спроектовані конструкції	111
8.2. Кріплення регульованого опору	116
Питання для самоконтролю	118
9. МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ КРІПЛЕННЯ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД	119
9.1. Огляд методів	119
9.2. Аналіз принципів та схем розрахунку кріплення	124
Питання для самоконтролю	129
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	130

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Г. І. Гайко

**БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ І
КОНСТРУКЦІЇ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД.
КОНСТРУКЦІЇ КРІПЛЕННЯ**

Навчальний посібник
В авторській редакції

